LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

FEYNMAN

Cuando un fotón conoce a un electrón





NATIONAL GEOGRAPHIC

RICHARD FEYNMAN no sólo está considerado uno de los físicos más importantes del siglo XX, sino también una de las figuras más singulares y fascinantes de la ciencia contemporánea. Su campo de estudio principal fue la electrodinámica —la rama fundamental de la física que estudia las interacciones entre luz y materia, fotones y electrones— pero también dejó una profunda huella como profesor, divulgador y figura pública. Su intensa personalidad y sus contundentes opiniones le granjearon la admiración de muchos y la animadversión de unos pocos, pero lo que resulta indudable es que la física moderna no sería la misma sin él.

LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA

FEYNMAN

Cuando un fotón conoce a un electrón



NATIONAL GEOGRAPHIC

MIGUEL ÁNGEL SABADELL es físico y divulgador.
Es editor técnico de revistas de divulgación científica y ha asesorado a organismos tales como la Expo 2008, el Centro de Astrobiología (INTA-CSIC), vinculado a la NASA, y la European Space Agency (ESA).

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Aisa: 91; Archivo RBA: 30, 35, 39, 88, 121ad, 134; Biblioteca del Congreso de EE UU: 33, 67; Corbis: 91ai, 91ad, 98, 121ai, 121b, 130, 161a, 161b; Departamento de Energía de EE UU: 46, 72, 75a, 75b; Getty Images: 107; Gert-Martin Greuel: 143; iStockphoto: 53; Museo Boerhaave, Leiden, Países Bajos: 118; Smithsonian Institution: 80.

ISBN: 978-84-473-7641-4
Depósito legal: B-28712-2015

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

Algunos hechos sobre mi vida: nací en 1918, en una pequeña villa llamada Far Rockaway, justo a las afueras de Nueva York, cerca del mar. Allí viví diecisiete años, hasta 1935. Estudié cuatro años en el MIT y después fui a Princeton, a mediados de 1939. Estando en Princeton, comencé a trabajar en el Proyecto Manhattan, y finalmente me trasladé a Los Álamos en abril de 1943, donde estuve hasta algo así como octubre o noviembre de 1945, cuando ingresé en Cornell. Me casé con Arline en 1941. Murió de tuberculosis en 1945, estando yo en Los Álamos. Permanecí en Cornell hasta 1951. Visité Brasil en 1950, y pasé medio año allí en 1951; después ingresé en Caltech, donde he permanecido desde entonces. Visité Japón durante un par de semanas, a finales de 1951, y otra vez algunos años más tarde, cuando me casé con mi segunda esposa, Mary Lou. Ahora estoy casado con Gweneth, que es inglesa, y tenemos dos hijos, Carl y Michelle.

De esta manera tan lacónica describió Richard Phillips Feynman («Dick» Feynman) su historia en 1985, cuando se publicó por primera vez el libro con las anécdotas de su vida: *¿Está usted de broma, Sr. Feynman?* Estuvo catorce semanas en la lista de los más vendidos de *The New York Times* y es de los pocos libros de ciencia que, aún hoy, se sigue reeditando. Junto con su otro libro autobiográfico *¿Qué te importa lo que piensen los demás?*, mues-

tra parte del carácter de un hombre singular y con una intuición física fuera de lo común. Prueba de ello es que en 1979 la entrevista que le hizo la desaparecida revista *Omni* llevara el título «El hombre más inteligente del mundo». Dicen que cuando su madre se enteró, no pudo por menos que exclamar: «¿Nuestro Richie? ¿El más inteligente del mundo? ¡Dios nos libre!».

En diciembre de 1999, la revista *Physics World* mandó un cuestionario a 250 físicos donde se les pedía, entre otras cosas, que mencionaran a las cinco personas que hubieran hecho la contribución más importante a la física: Feynman apareció en séptimo lugar, detrás de Einstein, Newton, Maxwell, Bohr, Heisenberg y Galileo. Muchos físicos se asombraron de que su brillante colega hubiera sido encumbrado a la altura de un Einstein. Uno de los más pasmados fue el también premio Nobel de Física, Murray Gell-Mann, antiguo colega de Feynman y quien se ganó un puesto en la historia de la física por poner orden en el zoo subatómico al formular su teoría de los quarks, los ladrillos con los que se construyen protones y neutrones, entre otras partículas. Durante años, una de las clásicas preguntas entre los físicos era: «¿Quién es más inteligente, Murray o Dick?».

Basta un vistazo a la librería del Instituto Tecnológico de California en Pasadena —el famoso Caltech—, donde Feynman trabajó hasta su muerte, para comprobar lo que su nombre significa. En los estantes podemos encontrar copias de sus grandes éxitos. Allí se venden las palabras de quien es considerado por muchos como el mayor físico de la segunda mitad del siglo XX. Se puede escoger entre tres biografías, los dos tomos de sus recuerdos autobiográficos, una colección de sus dibujos, grabaciones con sus actuaciones tocando los bongós... Desde su muerte, acaecida en 1988, lo que podría llamarse la «industria Feynman» no ha dado muestras de cansancio. Obras recientes, como *Seis piezas fáciles*, *Seis piezas no tan fáciles*; *La conferencia perdida de Feynman*, o sus famosas *The Feynman Lectures on Physics*, un *pack* en tres volúmenes de las clases de física elemental que impartió a principios de la década de 1960 y que fue reeditado y ampliado en 2005 (algo inaudito en un libro de texto) demuestran a todas luces que estamos ante un personaje muy especial.

La fascinación que muchas generaciones de físicos han tenido por su figura se explica en parte gracias a su magnetismo, a ese gran encanto personal que destilaba, capaz de fascinar, incluso después de su muerte, a ambos sexos por igual. De curiosidad insaciable, su obituario le recuerda como «el físico teórico más original de nuestro tiempo», «extraordinariamente honesto consigo mismo y con cualquier otro», «no le gustaba ni la ceremonia ni la pomposidad», «era extremadamente informal»... De todo ello no hay duda alguna: ha sido el más iconoclasta, brillante e influyente físico de la segunda mitad del siglo xx. Fue uno de los que desenmarañó la teoría cuántica, el inventor de los hoy ubicuos diagramas que llevan su nombre, bullicioso y pachanguero como pocos, músico de bongós autodidacta y un brillante narrador de historias, sus propias historias. Su forma de ver el mundo de los átomos, de reinventar la teoría cuántica, se ha convertido en un estándar en la física y ha permitido numerosos avances en la comprensión de la materia.

Mucho se ha escrito sobre Feynman y su nombre va acompañado de adjetivos que van de egocéntrico a simpático. Cuando entraba en la cafetería del Instituto Tecnológico de California, en sus años de profesor, el nivel de ruido descendía a su alrededor: todos, hasta sus colegas, querían escuchar lo que tenía que decir. Los físicos más jóvenes imitaban su forma de escribir y su manera de «arrojar» ecuaciones en la pizarra. Hasta se hizo un divertido debate sobre si era humano... La mayoría envidiaba cómo la inspiración parecía llegarle a ráfagas, su fe en las verdades simples de la naturaleza, su escepticismo hacia la sabiduría «oficial» y su impaciencia con la mediocridad. Sus dos autobiografías —que no escribió; de hecho ninguno de sus múltiples libros fueron escritos por él, sino que son transcripciones de conferencias o conversaciones— han sido y son fuente tanto de carcajadas como de inspiración vocacional. Ambas reúnen una colección de anécdotas tan divertidas que resulta increíble creer que le hayan podido pasar a una única persona. En un recordatorio de su muerte, el premio Nobel de Física de 1969, Murray Gell-Mann, dijo (para enfado de la familia): «Se rodeó con una nube de mito, e invirtió gran parte de su tiempo y energías en generar anécdotas sobre él mismo».

Feynman es un icono de la cultura iconoclasta, poco aferrada al pasado y la tradición, que tan querida es en Norteamérica; es el epítome de la ideología del *self-made man* estadounidense, para quien solo el cielo es el límite. Así, no es de extrañar que haya una obra de teatro sobre él: *QED*. Narra un par de días en la vida de Feynman en 1986, dos años antes de su muerte, y fue escrita a instancias del actor Alan Alda, famoso en la década de 1970 por su interpretación de *Hawkeye* Pierce en la serie de televisión M.A.S.H. y cuyo interés por la ciencia lo demuestran sus doce años de presentador del exitoso programa de divulgación científica *Scientific American Frontiers*.

Quien mejor ha expresado el sentir de la comunidad científica hacia los logros intelectuales de este físico nacido en un barriada de Queens, Nueva York, fue Mark Kac, un eminente matemático polaco-norteamericano que ganó notoriedad en 1966 haciendo una pregunta muy del estilo de Feynman y sobre un instrumento que el físico adoraba: «¿Se puede oír la forma de un tambor?». El artículo con ese título, publicado en el *American Mathematical Monthly*, intentaba responder a si era posible inferir la geometría de un tambor a partir del espectro de sonido que produce. Y la respuesta es, en general, no. Kac escribió en su autobiografía:

> En ciencia, como en otros campos del trabajo humano, hay dos tipos de genios: el «corriente» y el «mago». Un genio corriente es alguien como usted y yo, solo que muy superior. No hay ningún misterio en cómo trabaja su mente. Una vez que hemos entendido lo que ha hecho, sentimos que nosotros también podemos hacerlo. Con los magos es diferente. [...] La forma de trabajar de sus mentes es, en todos los sentidos, incomprensible. Rara vez, si sucede, tienen estudiantes, porque no se les puede emular y debe ser terriblemente frustrante para una mente joven y brillante lidiar con los misteriosos caminos por los que discurre la mente de un mago. Richard Feynman [era] un mago del máximo calibre.

Feynman no fue un físico convencional, ni quiso serlo. Mientras todos sus colegas viajaban a Europa cuando salían por primera vez al extranjero, él se marchó a Brasil. Vivió intensamente el amor

con dos de sus tres esposas, Arline y Gweneth, pero también amó a muchas otras mujeres: bailarinas y prostitutas, estudiantes y esposas de colegas, ligues pasajeros en sus viajes al extranjero a causa de congresos científicos... Tenía una mesa reservada en un club de *striptease* cercano a su querido Caltech y las clases se llenaban de estudiantes y colegas para escuchar cómo su mente enfocaba de manera diferente la física de toda la vida. Pocas veces leyó los artículos de sus colegas, pues le gustaba llegar por él mismo a las conclusiones que otros habían pensado. Nunca se fió de una idea que él no hubiera deducido a partir de primeros principios, el sello de todo su trabajo, una peligrosa virtud que a veces conduce al error y a la pérdida de tiempo. Pero no en él: «Dick podía con todo porque era condenadamente brillante —confesó en cierta ocasión un físico teórico—. Podía subir el Mont Blanc descalzo».

El trabajo de este curioso personaje —así se autotitulaba en su autobiografía— es tremendamente abstracto. Su campo fue la teoría cuántica, que había cumplido su mayoría de edad cuando él nació. Establecer las leyes que gobiernan el mundo subatómico fue una tarea ardua y difícil, e involucró a las grandes mentes de la física de la primera mitad del siglo XX. El mundo de las partículas elementales contradice el sentido común, que proviene de nuestra experiencia cotidiana, y su comprensión aún hoy se nos escapa. Sin embargo, la capacidad predictiva de la física cuántica está fuera de toda duda. Podemos renunciar a entenderla filosóficamente, incluso nos puede parecer incongruente a tenor de lo que esperamos que sea el universo —el propio Einstein renegó de ella por este motivo—, pero su alcance científico y tecnológico está fuera de toda duda.

La física cuántica exigió el desarrollo de muchas herramientas para poder dar cuenta de los fenómenos que pretendía explicar. Durante la primera mitad del siglo XX, los físicos tuvieron que echar mano de ramas de las matemáticas ideadas varias décadas antes —y de las que nadie creía que tendrían una aplicación práctica— para resolver los problemas que surgían de las entrañas de la materia. Pero eso no bastó: también hubo que inventar toda una nueva artillería matemática con la que derribar las murallas que separaban la teoría del experimento. Es en este campo donde destacó Richard Feynman, y donde hizo su mayor contribución. Uno

de los problemas más graves que debía encarar la física de la década de 1930 era la aparición de infinitos en la teoría que explica la interacción entre la materia y la luz. Si se pretendía calcular lo que sucedía cuando un electrón chocaba con un fotón, el resultado era desastroso, pues los infinitos plagaban las cuentas, y nadie sabía cómo solventar esta situación. Los físicos estaban tan desesperados que organizaban congresos solo para tratar este tema. Feynman fue uno de los tres que lo resolvieron. Pero, a diferencia de los otros dos —el japonés Shin'ichiro Tomonaga y el norteamericano Julian Schwinger—, solo la reformulación de la teoría cuántica desarrollada por Feynman ha sobrevivido al paso del tiempo. De hecho, los famosos diagramas que llevan su nombre se encuentran en prácticamente todas las disciplinas de la física que tienen que ver con el mundo de lo más pequeño.

Sin embargo, la contribución de Feynman a la física no termina aquí. Su increíble intuición física le llevó a desvelar porqué el helio líquido, a temperaturas cercanas al cero absoluto (–273 °C), podía subir por las paredes del recipiente en el que se encontraba y rebosar al exterior: es el fenómeno de la superfluidez. También contribuyó a esclarecer la teoría que se esconde detrás de la fuerza débil, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza y que explica ciertas desintegraciones radiactivas. Finalmente, ayudó a convencer a la comunidad científica de que los quarks postulados por su colega Murray Gell-Mann, las partículas con las cuales se construyen los protones y neutrones, no eran un artificio matemático, sino que tenían una existencia real.

Pero a Richard Feynman no solo le preocupó la investigación científica; también estaba interesado en cómo divulgarla y en cómo enseñarla. Sus conferencias «Qué es la ciencia» y «El valor de la ciencia» siguen siendo fuente de inspiración para estudiantes e investigadores. Sus clases de física elemental, recogidas en una serie de libros que después de medio siglo se siguen reeditando, son un ejemplo de cómo entendía el verdadero amor de su vida este físico de Nueva York. Dos eran sus frases-fetiche, que tenía escritas en la pizarra de su despacho: «Lo que no puedo crear no lo entiendo» y «Aprende a resolver todos los problemas que ya han sido resueltos». La física era su pasión; toda la física. Para él, la

ciencia estaba en continuo cambio, que comparaba con la forma de las nubes: «las miras y no parecen cambiar, pero si vuelves a hacerlo después de unos minutos, ves que todo es diferente».

Feynman exploraba los caminos que ya habían sido recorridos por otros, pero desarrollaba una serie de ingeniosas técnicas matemáticas que, unidas a profundas intuiciones físicas, modificaban la manera de entender y de trabajar en ese campo. Su forma un tanto caótica de trabajar no pasaba por el formalismo matemático de axioma-teorema-demostración. Literalmente, Feynman intuía cuál era la situación y la comprobaba una y otra vez, en todas las situaciones posibles. Sin embargo, su interés último no era ser original, sino no estar equivocado. «Siempre he estado preocupado por la física —decía—. Si la idea me parecía nefasta, decía que era nefasta. Si parecía buena, decía que era buena.»

Una de las grandes habilidades de Feynman era estar concentrado durante horas en un problema, algo que a sus padres les preocupaba cuando era un adolescente y dedicaba parte de su tiempo a arreglar las radios descompuestas de sus vecinos; las abría y se quedaba mirándolas, intentando comprender qué era lo que había fallado. No es de extrañar que entre sus vecinos corriese la voz de que arreglaba las radios pensando... Al poco de terminar su tesis doctoral, un equipo del Proyecto Manhattan se encontró con él en Chicago, donde resolvió un problema que les estaba llevando de cabeza desde hacía un mes. Pero lo que les impresionó no fue tanto esa hazaña intelectual como su imagen poco profesional: «Era patente que Feynman no se había forjado en el mismo molde que la mayoría de los jóvenes universitarios de la preguerra. Tenía las expresivas posturas de un bailarín, el discurso rápido que pensábamos había en Broadway, las frases hechas de un estafador y la verborrea de un caradura».

Finalmente, lo que convirtió a Feynman en una figura pública, más allá del reducido mundo de la comunidad de físicos, fue su presencia en el comité que la NASA creó para investigar el accidente del transbordador espacial Challenger en 1986, dos años antes de su muerte. En él, un enfermo Feynman actuó de la misma forma que había hecho en ciencia: no fiarse de nada que él no hubiera estudiado personalmente. Así que en lugar de leerse pági-

nas y páginas de informes anónimos, se puso a entrevistar a ingenieros y científicos de la NASA, e hizo los experimentos que consideró oportunos hasta que estuvo seguro de cuál había sido el fallo. Su momento de gloria llegó en una de las sesiones públicas de la comisión; en ella, realizó un pequeño experimento. Sospechaba que la causa del accidente se encontraba en un pequeño defecto que tenían las juntas de goma que se usaban para sellar los tanques de combustible (conocidas técnicamente como *O-ring* por su forma característica): sometidas a bajas temperaturas, no recuperaban con facilidad su forma inicial y durante unos pocos segundos, justo durante el encendido de los motores, no ajustaban perfectamente debido a la dilatación del tanque y se producía una pequeña pérdida de combustible que demostró ser fatal: en las fotografías tomadas durante el accidente se pudieron ver llamas salir por el lugar donde estaban esas juntas. Así que Feynman, delante de todos los periodistas y las cámaras de televisión, comprimió con unas tenazas una de las pequeñas juntas de goma, para simular la situación real en el transbordador, y la metió unos segundos en un vaso con hielo para demostrar que, sometidas a las bajas temperaturas que se habían alcanzado la noche previa del lanzamiento, no se recuperaban como se esperaba. Al terminar la demostración, Feynman no salió muy seguro de que la sesión hubiera convencido a nadie, pero había subestimado la perspicacia de los periodistas. Esa noche todos los telediarios dieron la noticia: la causa del accidente estaba perfectamente clara y Feynman se convirtió en un héroe para todos los norteamericanos.

Tras la muerte de Feynman se escribieron muchos epitafios, pero quien mejor expresó su legado fue Julian Schwinger, su rival científico más preeminente en el tiempo de la posguerra y con el que compartió el premio Nobel: «Un hombre honesto, el más destacado intuitivo de nuestra era y el principal ejemplo de lo que puede encontrar en la playa cualquiera que desee seguir el ritmo de un tambor diferente».

1918 El 11 de mayo nace en Far Rockaway, Nueva York, Richard P. Feynman.

1939 Gana la competición matemática William Lowell Putnam. Se gradúa en el MIT.

1941 Se casa con Arline Greenbaum, enferma de tuberculosis.

1942 Le ofrecen trabajar en el Proyecto Manhattan. Entrega su tesis doctoral: «The Principle of Least Action in Quantum Mechanics».

1945 Muere Arline. Presencia el estallido de la primera bomba atómica. Acabada la guerra, se incorpora a la Universidad de Cornell como profesor.

1948 Acude al encuentro en las montañas Pocono sobre la QED. Aparición de los diagramas de Feynman en el artículo de Freeman Dyson «The radiation theories of Tomonaga, Schwinger and Feynman».

1949 Se publica «Space-Time approach to Quantum Electrodynamics», donde aplica sus diagramas a la interacción fundamental entre dos electrones. Éxito en la presentación de sus ideas en el tercer encuentro de la QED en Oldstone-on-the-Hudson.

1953 Explica la transición del helio superfluido.

1955 Pronuncia su famosa conferencia «El valor de la ciencia» en la Academia Nacional de Ciencias (NAS) norteamericana.

1958 Junto con Murray Gell-Mann, publica su explicación de la fuerza débil: «Theory of the Fermi Interaction» en *Physical Review*.

1960 Imparte la conferencia fundadora de la nanotecnología en el encuentro anual de la American Physical Society. Se casa con Gweneth Howarth.

1961 Investiga en bioquímica, en particular el bacteriófago T4D.

1961-1963 Dicta los cursos de física elemental que le harán famoso: «The Feynman lectures on physics».

1965 Concesión del premio Nobel de Física, que comparte con Julian Schwinger y Shin'ichiro Tomonaga.

1985 Aparece *¿Está usted de broma, Sr. Feynman?*, una colección de anécdotas de su vida.

1986 Participa en el comité de investigación del desastre del transbordador espacial Challenger.

1988 Muere en Los Ángeles, California, el 15 de febrero, a la edad de sesenta y nueve años.

CAPÍTULO 1

Un nuevo mundo cuántico

Entender la constitución última de la materia es una aventura intelectual que comenzó con Demócrito, en la antigua Grecia. Sin embargo, no fue hasta finales del siglo XIX cuando empezamos a darnos cuenta de lo que era y significaba el mundo de los átomos. En 1890, y sin que nadie lo advirtiera, empezó a incubarse una revolución conceptual que culminaría en 1930: la teoría cuántica.

Once de mayo de 1918. La polémica política estaba servida: en pocos días el presidente de Estados Unidos, Woodrow Wilson, firmaría la polémica Acta de Sedición de 1918, «la más dura legislación de la nación contra la libertad de expresión», en palabras del historiador sobre derechos civiles norteamericanos Geoffrey R. Stone. En ella se ampliaban los delitos contemplados en el Acta de Espionaje de 1917 a cualquier opinión o discurso hechos en público que usaran «un lenguaje insultante, irreverente, difamatorio, despectivo o desleal hacia el Gobierno de Estados Unidos, la forma de gobierno o la bandera», señalaba *The New York Times*. En definitiva, su objetivo era perseguir comportamientos poco patrióticos en medio de una guerra que acabaría terminando en pocos meses. En esos momentos, cerca de un millón de soldados norteamericanos se encontraban en el frente occidental, la mitad de ellos en retaguardia y la inmensa mayoría llegados a la ensangrentada tierra europea hacía pocos meses. El frente occidental se veía azotado por la ofensiva de primavera planeada por el general Erich Ludendorff. El alto mando alemán sabía que debía arrollar a los ejércitos francés y británico antes de que los norteamericanos desplegaran todo su poderío. Además, rompiendo las líneas del frente occidental podrían alcanzar un armisticio en condiciones. En este contexto, y a pesar de que esta ley de Wilson era un mazazo legal contra la libertad de expresión, la práctica totalidad de los periódicos norteamericanos la aplaudieron.

No se sabe cuál habría sido la opinión de un judío asquenazí emigrado de Minsk (Bielorrusia), un hombre que enseñó a sus hijos a cuestionar la ortodoxia, a plantearse dudas: Melville Feynman. En aquel último año de la Gran Guerra vivía junto a su mujer, Lucille Phyllips, en Far Rockaway, un pequeño villorrio del condado de Queens (uno de los cinco *boroughs* que componen la ciudad de Nueva York) situado en la costa sur de Long Island. Allí se encontraba asentada una importante colonia judía con un temperamento lo suficientemente abierto y liberal para aceptar ateos como Melville: eran miembros del judaísmo reformado, una corriente que nació en la Alemania del siglo XVIII —pocos años antes de su muerte, Richard Feynman visitó la ciudad de su niñez y descubrió cómo sus habitantes habían virado hacia la más pura ortodoxia—.

«Solo a base de trabajar duro puede descubrirse algo.»

— Richard Feynman.

Sin embargo, ese día de mayo Melville estaba preocupado por algo mucho más cercano e importante, el nacimiento de su primer hijo. Cuenta la leyenda familiar que había comentado a Lucille: «Si es niño, será científico». A lo que ella respondió: «No cuentes los pollos antes de que rompan el cascarón».

Melville siempre había sentido pasión por la ciencia, pero para un judío inmigrante de entonces esto era algo con lo que únicamente podía soñar, nunca cumplir. Así que se dedicó a lo que desde tiempos inmemoriales ha sido casi lo único que se les ha dejado hacer a los judíos: negocios. Vendió uniformes de policía, carritos para llevar correo, una cera para coches llamada Whiz... Su manera de educar fue muy sutil. El mismo Richard reconocería tiempo más tarde que no sabía cómo su padre le llevó hacia la ciencia, pues nunca le dijo algo como «tú tienes que estudiar física». Lo que le enseñó fue la forma en que se hace ciencia, a hacer preguntas en lugar de regalarle respuestas, a que estuviera más atento a lo que no sabía que a lo que sabía. De este modo, le mostró que se puede vivir sin saber las respuestas a las preguntas más importantes; incluso que es preferible vivir así. Por su parte,

Lucille inculcó en su hijo un poderoso sentido del humor, la capacidad de reírse de sí mismo y, sobre todo, cómo tener coraje para lanzarse al mundo. Dichas cualidades demostraron ser decisivas en la vida que le esperaba al joven Richard.

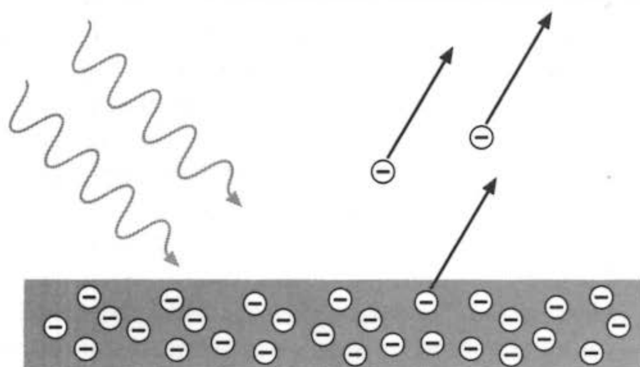
Cuando tenía cinco años, «Ritty» conoció la llegada de un hermanito, que recibió el nombre de Henry Phillips en honor al abuelo materno que había muerto el año anterior. Pero la desgracia les esperaba a la vuelta de la esquina: a las cuatro semanas el bebé se puso muy enfermo y murió un mes más tarde, el 25 de febrero de 1924, posiblemente debido a una meningitis. En noviembre de ese mismo año, y a 5800 kilómetros de distancia, el hijo menor de Victor, quinto duque de Broglie, presentaba su tesis doctoral en física de la que Albert Einstein dijo: «Ha levantado una esquina del gran velo», en una clara alusión a la famosa frase con la que, tiempo atrás, Louis Pasteur definió el trabajo científico. Louis de Broglie acababa de cambiar la manera que se tenía de entender la materia para siempre. Era el punto de inflexión de una revolución que había empezado a pergeñarse hacía treinta años, durante la llamada «década malva».

MISTERIOS Y REVOLUCIONES

Los últimos años del siglo XIX estaban siendo científicamente agitados y, sin embargo, aún había quien sostenía que «ahora no hay nada nuevo que descubrir. Todo lo que queda es hacer medidas cada vez más precisas», según palabras atribuidas al físico británico William Thomson (lord Kelvin) en 1900. Se había descubierto una partícula, el electrón, que nadie sabía de dónde venía, y también que ciertos compuestos de uranio emitían una radiación de naturaleza desconocida. Un nuevo misterio, la radiactividad, entraba en escena. Para terminar de enredar las cosas, las dos grandes teorías de la física del siglo XIX eran incompatibles. Por un lado estaba la mecánica de Newton, que se ocupa de los cuerpos en movimiento, y por otro el electromagnetismo, explicado en 1873 por el escocés James Clerk Maxwell. Galileo ya había suge-

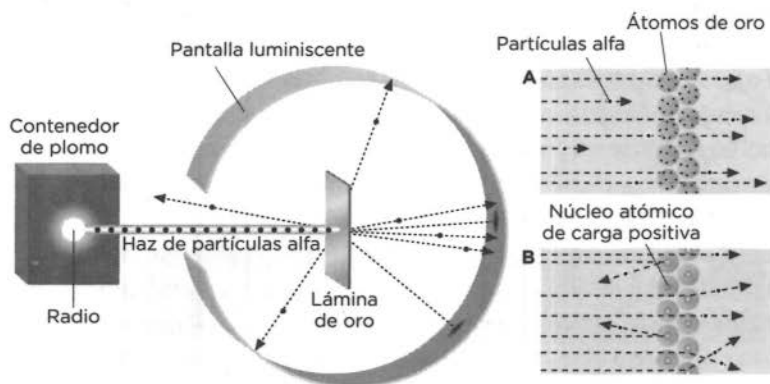
rido que las leyes físicas eran las mismas independientemente de si estamos quietos o corriendo a velocidad uniforme. Esto funcionaba de perlas con pelotas y piedras, pero no con la luz. Al final fue la teoría especial de la relatividad de Einstein la que resolvió el problema: la dinámica de Newton se aplicaba bien a cuerpos que viajan a velocidades pequeñas, pero no si estos se mueven a velocidades cercanas a la de la luz.

Por otro lado, el desarrollo de la termodinámica, la ciencia del calor, había traído de la mano una hipótesis que por antigua no era menos polémica: la materia estaba hecha de átomos minúsculos e indivisibles. Suponer que no era continua sino discreta había permitido aplicar las leyes de la mecánica y, con ella, calcular muchas de las propiedades físicas de la materia. Pero no todos los científicos estaban convencidos. Uno era el alemán Max Planck, un experto en termodinámica clásica y para quien los átomos eran «un enemigo para el progreso» que al final «serán abandonados por la suposición de una materia continua». Curiosamente este físico protagonizaría una de las revoluciones conceptuales más importantes de la historia de la ciencia: el 14 de diciembre de 1900 anunciaba en la Sociedad Alemana de Física algo absolutamente aberrante para las mentes de entonces, que la materia no puede absorber energía en cantidades cada vez más pequeñas; existe una cantidad mínima de energía por debajo de la cual no se puede bajar, el *cuanto*. Su valor viene dado por una simple ecuación que relaciona la energía con la frecuencia de la luz (el «color» de la luz): $E = h\nu$, donde h es una constante de proporcionalidad que acabó conociéndose como la constante de Planck. Cinco años más tarde, Albert Einstein fue más allá para explicar el efecto fotoeléctrico (figura 1); cotidianamente lo vemos en acción en puertas, en la cinta de las cajas de los supermercados, en las escaleras mecánicas, en el encendido del alumbrado público cuando anochece... En uno de sus tres grandes trabajos aparecidos en el mítico volumen 17 de la revista *Annalen der Physik*, propuso que no solo la materia absorbía la radiación de manera cuantizada, en paquetes discretos de energía, sino que la propia luz estaba cuantizada. Era algo que no se barajaba en la física desde los tiempos de Newton: que la luz se comportaba como un flujo de partículas, los fotones.



El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones desde la superficie de un metal al incidir sobre ella luz de una cierta frecuencia. El enigma era por qué existía esa frecuencia umbral. Einstein dio con la explicación.

Poco a poco empezaba a ver la luz lo que se encontraba escondido entre los pliegues de la materia. En 1904 J.J. Thomson había propuesto un modelo de átomo donde los electrones se encontraban repartidos por el interior de una esfera, como las pasas en un pudín. Pero los experimentos de 1909 del neozelandés Ernest Rutherford dieron al traste con este modelo. Rutherford, junto a Hans Geiger y Ernest Marsden, habían lanzado partículas alfa (un tipo de radiactividad donde se emite un núcleo de helio, dos protones y dos neutrones) contra una fina lámina de oro y, contra todo pronóstico, solo una de cada 8 000 partículas era desviada, algunas veces más de 90 grados. La sorpresa de Rutherford fue absoluta: estaba disparando cañonazos contra una hoja de papel ¡y algunas balas rebotaban! Según el modelo de átomo de Thomson, eso no podía pasar. La única manera de interpretar estos resultados era postulando un modelo atómico distinto, similar a un sistema solar en miniatura: un núcleo muy pequeño que contenía prácticamente la totalidad de la masa del átomo y cargado positivamente, y los electrones dando vueltas a su alrededor. Ahora bien, según las inevitables leyes del electromagnetismo, los electrones tenían que perder energía y acabar cayendo sobre el núcleo. Si el modelo de Rutherford (figura 2, página siguiente) era correcto, la materia no podía existir. Sin embargo, ahí estaba.



A. Lo que se esperaba si el modelo atómico de Thomson fuera correcto.
B. Lo que en realidad se observó.

El modelo del pudín de pasas de Thomson suponía que los electrones se encontraban repartidos por el interior del átomo —cargado positivamente— «como las pasas en un pudín». El experimento realizado por Rutherford, donde partículas alfa salían rebotadas al chocar con los átomos de la lámina de oro, solo podía explicarse si toda la carga positiva del átomo se encontraba concentrada en un espacio muy pequeño en el centro.

Este lamentable estado de cosas fue resuelto parcialmente por un brillante danés llamado Niels Bohr (1885-1962). En 1911, con una pobre traducción de su tesis al inglés y una beca de la Fundación Carlsberg, dirigió sus pasos a Gran Bretaña para trabajar en el Laboratorio Cavendish. Lo primero que hizo nada más llegar fue entrar en el despacho de Thomson con uno de sus libros sobre la estructura atómica en la mano, señalar una determinada sección y espetarle sin contemplaciones: «Esto está mal». Al año siguiente se mudó a Manchester para trabajar con Rutherford y en 1913 publicaba la solución al modelo del neozelandés: los electrones dan vueltas alrededor del núcleo en una serie de órbitas predeterminadas y al hacerlo no pierden energía. Para pasar de una órbita a otra, el electrón absorbe o emite —dependiendo de si se aleja o se acerca al núcleo— uno de los fotones de luz de Einstein que debía poseer exactamente la misma energía que requería el cambio de órbita. La propuesta era radical y rompía con el electromagnetismo clásico; sin embargo, tenía la virtud de explicar el inexplicable espectro del átomo de hidrógeno, su huella dactilar en forma de finas líneas luminosas situadas en diferentes lugares del espectro electromagnético.

La publicación del artículo de Bohr marcó el principio del fin de la visión clásica del mundo, pero lo peor estaba por venir. Einstein había demostrado que la luz presentaba dos naturalezas: corpuscular, como los balines disparados en una feria, y ondulatoria, como las olas de un estanque. En 1924 el francés Louis de Broglie completó esta visión al afirmar que los balines no tenían que comportarse siempre como balines; también podían comportarse como las olas de un estanque.

Después de la Gran Guerra, De Broglie, que había estudiado historia medieval y derecho en la Sorbona, empezó a trabajar con su hermano Maurice en el campo de los rayos X. En ese momento descubrió su pasión por la física y empezó a interesarse por las revolucionarias ideas de Planck, Einstein y Bohr. Se le ocurrió que el tema de su tesis doctoral sería explorar lo que surgiría de la combinación de las dos ecuaciones más representativas que el nuevo siglo había visto nacer: $E = mc^2$, de la relatividad especial, y $E = h\nu$, de la hipótesis cuántica de Planck. Y lo que dedujo fue algo que los miembros del tribunal de su tesis no supieron si tomarlo en serio: los electrones tenían una longitud de onda asociada que se podía medir experimentalmente.

De este modo, De Broglie generalizaba la propuesta de Einstein, extendiéndola a toda la materia: si las ondas electromagnéticas tenían características propias de las partículas, ¿por qué la materia no iba a tener características ondulatorias? La principal consecuencia de la idea de De Broglie era que si los electrones se comportaban como ondas, deberían difractarse, como hace la luz. Sorprendentemente eso ya se había observado: a comienzos de la década de 1920 un físico de la Bell Telephone, Clinton Joseph Davisson, que se dedicaba a bombardear cristales de níquel con electrones, observó ciertas regularidades en la forma en que se esparcían los electrones por la superficie del cristal, pero hasta 1927 no supo comprender que se trataba de un fenómeno de difracción.

Con esta revolucionaria idea De Broglie obtuvo otro importante resultado: pudo explicar, en función de fenómenos estrictamente ondulatorios, las órbitas permitidas que Bohr había introducido prácticamente ad hoc para el átomo. De Broglie publicó estas ideas, que fueron la base de su tesis, en una serie de

pequeños artículos en la revista *Comptes Rendus* de la Academia de Ciencias de París entre septiembre y octubre de 1923. Sus ideas se expandieron como la pólvora. El físico neerlandés Henrik Lorentz escribió a Einstein: «Es el primer débil rayo de luz en lo que es el peor de nuestros enigmas».

«Lo que necesitamos es imaginación, pero imaginación encorsetada en una terrible camisa de fuerza que es el conocimiento.»

— RICHARD FEYNMAN.

El siguiente paso lo dio en 1925 otro joven físico: el alemán Werner Heisenberg. Se había doctorado dos años antes en Múnich y su desdén por la física experimental le había causado ciertos problemas en el examen oral. Pero fue ese mismo desinterés el que le llevó a pensar que para hacer verdaderos progresos en la teoría atómica debía abandonarse cualquier intento por «entender» cómo funcionaba el átomo por dentro. Creía que la idea de los electrones orbitando alrededor del núcleo estaba fuera de lugar; nadie los había visto. Lo único que realmente se veía eran los fotones emitidos por los electrones al cambiar de «órbita», luego esto era lo único que había que tener en cuenta a la hora de desarrollar una teoría. De este modo, Heisenberg creó un esquema matemático, conocido como *mecánica matricial*, con el que fue capaz de reproducir los resultados de la vieja teoría cuántica de Bohr. Casi al mismo tiempo, el físico austriaco Erwin Schrödinger ofreció una formulación matemática para las ondas de materia de De Broglie: nació así la *mecánica ondulatoria*, la herramienta básica de los físicos teóricos. A Heisenberg no le gustó nada, pues la formulación de Schrödinger hacía suponer que esas «ondas» realmente existían. La batalla entre las dos formulaciones estaba en su punto álgido cuando Max Born demostró que no eran más que artilugios matemáticos utilizados para calcular la probabilidad de encontrar un electrón en una región del espacio. Fue Paul A.M. Dirac quien finalmente demostró que tanto Heisenberg como Schrödinger tenían razón: sus dos visiones del mundo atómico

eran maneras equivalentes de representar lo que desde entonces se conoce como *mecánica cuántica*.

La ruptura con el mundo clásico, el mundo que ven nuestros ojos, se hizo así definitiva. La mecánica cuántica proponía una visión totalmente probabilística del mundo: el balín no está en un determinado lugar, sino que existe una cierta probabilidad de que esté allí; de hecho, es posible encontrarle en cualquier lugar del universo. Incluso la noción de causalidad desaparece, quedando únicamente la probabilidad de que algo suceda. Podemos lanzar una pelota todas las veces que queramos contra una pared, no siempre rebotará; esto es solo probablemente verdadero. Puede que la pelota vaya a otro sitio y, entonces, solo podremos decir que había una cierta probabilidad de que eso sucediera. Porque, como el propio Feynman dijo en sus famosas clases de física, «a una escala muy pequeña las cosas dejan de comportarse como cualquier cosa de la que tengamos experiencia directa». Un precio muy alto por querer comprender los secretos de la materia.

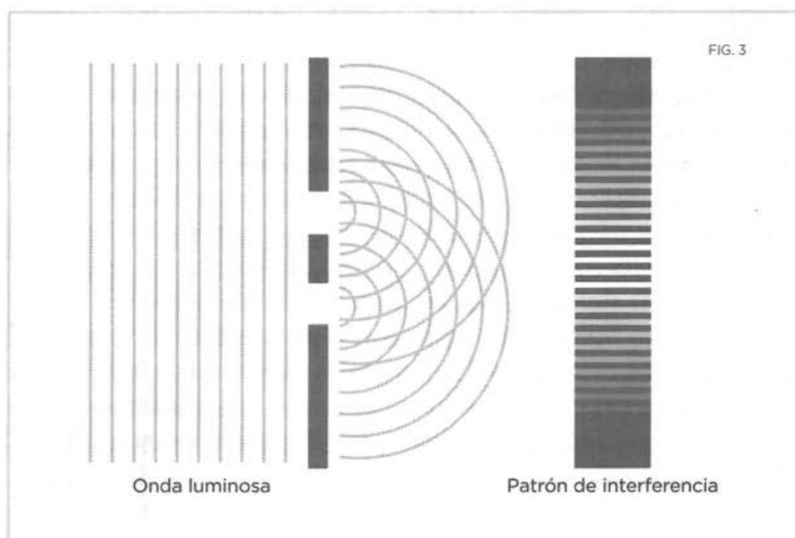
EL EXPERIMENTO DE LA DOBLE RENDIJA

Richard Feynman afirmó en cierta ocasión que este experimento encerraba todo el misterio y el encanto de la teoría cuántica:

> [Es] un fenómeno que es imposible, absolutamente imposible, de explicar por medios clásicos y que contiene en sí el alma de la mecánica cuántica. Contiene, en realidad, el único misterio.

En 2002 la revista *Physics World* preguntó a los físicos cuál sería, a su juicio, el experimento más bello de la historia: este se llevó el premio. Pero lo sorprendente es que desde su planteamiento teórico hasta su realización práctica tuvieron que pasar más de treinta años. Inicialmente era un experimento mental que se utilizaba para explicar ese extraño concepto de la física que es la dualidad onda-corpúsculo, pero en 1961, con la teoría cuántica ya firmemente asentada, el físico alemán Claus Jönsson, de la Uni-

Un tren de ondas se acerca a una barrera con dos rendijas muy estrechas y separadas por una pequeña distancia. Al pasar por ellas, cada una de las rendijas se convierte en un foco de ondas que interfieren entre sí formando un patrón característico en la pantalla.

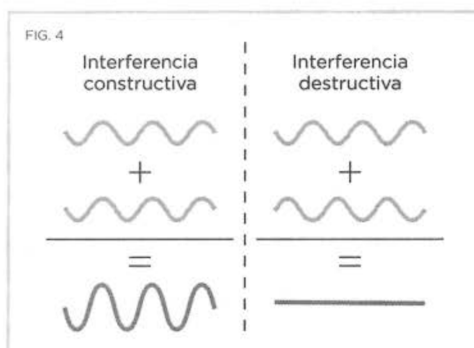


versidad de Tubinga, lo realizó por primera vez y lo publicó en la revista *Zeitschrift für Physik*.

Todo comenzó en 1801, cuando el científico inglés Thomas Young enunció su ley general de interferencia de la luz. Uno de los experimentos consistía en iluminar con luz un cartón en el que se habían practicado dos pequeñas incisiones para observar el patrón de interferencias que se producía en la pantalla situada detrás (figura 3). La situación es idéntica a lo que sucede cuando las olas se cuelan por un malecón con dos aberturas no muy grandes y no demasiado separadas: cada rendija se convierte en foco de nuevas olas que interfieren con las de la otra rendija, formando un llamativo patrón a lo largo de la playa. Lo que se observa es una franja luminosa en un punto de la pantalla justo enfrente del que se encuentra a mitad de camino entre ambas rendijas, luego una zona de oscuridad a ambos lados, después otra de luz menos intensa, y así sucesivamente. Es lo que se conoce como el *patrón de interferencia* (figura 4), una figura que solo puede formarse si la luz es una onda, que era lo que Young defendía en contra de la opinión de Newton.

Ahora introduzcamos una pequeña variante a este experimento, tal y como la explicaba Feynman en sus clases. Primero,

imaginemos una metralleta que dispara balas contra un dispositivo como el de Young, pero de manera que a cada agujero le hemos añadido un obturador de modo que podamos cerrarlo a conveniencia. Por supuesto, los agujeros tienen el tamaño justo para que pase la bala. Empezamos a disparar nuestra metralleta, con uno de los dos agujeros cerrado. Al final encontramos que —salvo aquellas pocas que han golpeado contra los bordes del agujero y han salido rebotadas en una dirección totalmente impredecible— las balas se han acumulado en la pared delante del agujero que estaba abierto. Si ahora abrimos el otro agujero en la pared se formarán dos acumulaciones de balas delante de cada uno de los agujeros. Lo importante aquí, y que no podemos olvidar, es que la forma de agruparse que tienen las balas en la pared del fondo es independiente de si el otro agujero está abierto o cerrado.



Las bandas luminosas y oscuras que aparecen en el experimento de la doble rendija son debidas a que las ondas interfieren de manera constructiva, sumando sus amplitudes (la altura de la cresta), o destructiva, debido a que llegan desfasadas, como se muestra en la figura.

Ahora hagamos este mismo experimento con luz. Si cerramos uno de los agujeros en la pantalla se formará una mancha de luz brillante en el borde que va perdiendo intensidad hacia los extremos. Si abrimos el segundo agujero veremos que, al contrario que con las balas, se forma el patrón de interferencia descubierto por Young. Esto es, la figura que se produce en la pantalla depende de si tenemos abierto o cerrado el segundo agujero.

¿Qué sucede si hacemos lo mismo con electrones? Si tapamos uno de los agujeros (que deben tener una anchura inferior a la longitud de onda de los electrones que les corresponde por la fórmula de De Broglie) observaremos que se forma el mismo patrón que en el primer experimento con las balas. Sin embargo, y esto es lo realmente extraño, si abrimos el segundo orificio lo que veremos aparecer en la pantalla es ¡el patrón de interferencias del experimento con la luz! Esto es lo que observó Davisson en los Laboratorios Bell en 1927: los electrones actúan como si fueran olas en un estanque.

Podríamos pensar que como estamos enviando un chorro de electrones, estos interaccionan entre sí al pasar por las dos rendi-

FUNCIONES DE ONDA


Erwin Schrödinger.

Según la teoría cuántica toda partícula lleva asociada una «función de onda» que, en un principio, se extiende por todo el universo. Esta función de onda es la que queda descrita matemáticamente por la ecuación de Schrödinger, que también nos explica cómo interaccionan estas ondas entre sí. Además, esta función de onda es más «intensa» en una región del espacio determinada, la que corresponde a la posición en la que uno esperaría encontrar al electrón, y se va debilitando a medida que nos alejamos de ella, pero no desaparece nunca. Así pues, la información que nos proporciona la función de onda es la probabilidad de encontrar al electrón en una región determinada del espacio y es mayor en el lugar donde, según nuestra forma de ver cotidiana, debe estar. Cuando detectamos el electrón la función de onda se «colapsa» y, en ese instante, sabemos con toda certeza dónde se encuentra. Pero en el momento en que dejemos de hacerlo, «la función de onda se expande de nuevo por todo el espacio e interfiere con las funciones de onda de otros electrones, e incluso, bajo determinadas condiciones, con la suya propia», según explica el físico británico John Gribbin.

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}=\frac{8\pi^2 m}{h^2}(V-E)\psi.$$

La mecánica cuántica ondulatoria enunciada por Erwin Schrödinger (1887-1961) se basa en la resolución de esta ecuación para las distintas situaciones físicas.

jas a la vez y se interfieren como si fueran esas ondas de materia que postulaba De Broglie. Para convencernos de nuestra idea, rebajamos la cadencia de tiro de nuestro cañón de electrones para disparar de uno en uno. Nuestra pantalla del fondo está cubierta de minidetectores Geiger que sueltan un clic cada vez que un electrón impacta contra ellos (no olvidemos que los Geiger detectan

partículas, no ondas). Empezamos a disparar electrones uno a uno de modo que nuestro cañón dispara el siguiente electrón cuando suena el correspondiente clic del anterior, lo que nos asegura que ya ha llegado a la pantalla. Después de dejar pasar un tiempo prudencial, y de estar seguros de que hemos lanzado varios miles de electrones, nos acercamos para ver cuál es la distribución de clics en la pared de detectores: la imagen resultante es el clásico patrón de interferencia ondulatorio. ¿Cómo es posible? ¿El electrón interfiere consigo mismo? Eso parece. Pero si se comporta como una onda, ¿cómo es posible que oigamos el clic del Geiger, que nos dice que allí ha llegado una partícula? Dicho de otro modo: si se produce un patrón de interferencias, el electrón pasa por las dos rendijas *a la vez* e interfiere consigo mismo, que es lo que hacen las ondas. Pero si lo detecta el Geiger en la pantalla, se trata de una partícula. ¡Una locura!

¿Realmente el electrón pasa por las dos rendijas? Eso es fácil de comprobar. Pongamos un detector en una de ellas de modo que sepamos por dónde pasa y repitamos el experimento. Al hacerlo nos espera una nueva sorpresa: los electrones dejan de comportarse como ondas y obtenemos el resultado de nuestro experimento con balas: solo los contadores Geiger que se encuentran enfrente de cada rendija se activan mientras que el resto, muchos de los cuales soltaron un clic en el experimento anterior, permanecen mudos. Cada electrón ha seguido un camino a través de una de las rendijas y ha dejado su huella en la pantalla.

En definitiva, lo que se encuentra en el fondo de este experimento es la desaparición de nuestro mundo cotidiano a escalas subatómicas. Existe una indeterminación fundamental en la naturaleza que no nos permite, por ejemplo, conocer con precisión la velocidad y la posición de una partícula, o la energía involucrada en un proceso y el tiempo que dura ese proceso. Esto es debido a que no podemos separar la naturaleza del acto de observación. Al hacerlo, modificamos el mundo, hacemos que el mundo sea de una forma y no de otra: veremos al electrón como partícula o como onda en función de lo que queramos ver. Aún más, no podemos decir que el electrón vaya de un sitio a otro moviéndose por un único camino; debemos abandonar el propio concepto de «ca-

mino». Los electrones no siguen unas trayectorias definidas como hacen las balas que dispara la metralleta, cuando un fotón choca con un átomo haciendo saltar uno de los electrones a una órbita superior, el electrón lo hace instantáneamente, sin atravesar el espacio intermedio. El electrón deja de existir en un punto para aparecer simultáneamente en otro: este es el famoso y desconcertante *salto cuántico*.

Así de desconcertante era la física a la que se iba a enfrentar Richard Feynman.

EL MUNDO DESDE EL MIT

La física de principios de siglo estaba dominada por Europa. La teoría cuántica se había desarrollado a espaldas de Estados Unidos, que estaba comprando cerebros a golpe de talonario. En el invierno de 1932 Abraham Fexner, el primer director y fundador del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, convenció a Albert Einstein para que se convirtiera en el primer profesor del instituto; el 17 de octubre del año siguiente Einstein, en compañía de su segunda mujer Elsa, su secretaria Helen Dukas y su ayudante Walther Mayer, llegaron a Nueva York. Como dijo el físico francés Paul Langevin, «es un acontecimiento tan importante como podría serlo la mudanza del Vaticano al Nuevo Mundo. El papa de la física se ha mudado de casa y Estados Unidos se ha convertido en el centro mundial de las ciencias naturales». Fue allí, entre los árboles que llevaban a su casa en la calle Mercer, donde se forjó esa imagen legendaria que nunca le abandonó.

La física norteamericana tenía unas preocupaciones diferentes a la europea. Mientras en el viejo continente se discutía sobre las implicaciones filosóficas de la mecánica cuántica, la estadounidense seguía empapada por el espíritu de Edison. La física teórica debía estar al servicio de la física experimental. «Un físico teórico solo debe pedir una cosa a sus teorías —exclamaba desafiante Slater a la luz de la revolución conceptual que llegaba

EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE «A LA ASIMOV»

En su libro *Asimov on physics* (1976), el escritor científico ruso Isaac Asimov (1920-1992) explica la relación entre la energía y el tiempo con la siguiente analogía: en una clase hay un alumno que cada vez que se vuelve el profesor para escribir en la pizarra le gusta hacer de las suyas. Si no causa mucho alboroto (lo que en el mundo cuántico corresponde a una situación donde interviene una pequeña cantidad de energía), y solamente saca la lengua, lo podrá hacer durante un intervalo de tiempo significativamente largo. Sin embargo, hacer otras proezas como ponerse de pie encima del pupitre (mucha energía), le exige hacerlo muy rápido para que el profesor no le pille. Puede parecer una violación del sacrosanto principio de conservación de la energía, pero las relaciones de incertidumbre de Heisenberg son inapelables: puedes «tomar prestada» cierta cantidad de energía siempre y cuando la devuelvas antes de que se cumpla el corto tiempo límite del «préstamo», y es más efímero cuanto mayor sea la cantidad de energía prestada.



Isaac Asimov en 1965.

desde Europa—: hacer predicciones razonablemente buenas sobre los experimentos.» Nada más. Un físico nuclear, Edward Condon (que en la década de 1960 se haría famoso por dirigir el Proyecto OVNI de la Universidad de Colorado) explicaba con ironía lo que él entendía que era el trabajo de los físicos teóricos: «Estudian cuidadosamente los resultados obtenidos por los experimentales y luego reescriben su trabajo en artículos tan matemáticos que resultan difíciles de leer incluso para ellos mismos».

Si así se pensaba de la física teórica, era imposible que salieran mejor paradas las matemáticas. A pesar de todo, Feynman

llegó al MIT con la intención de estudiarlas. A mediados del primer curso entró en el despacho del director del departamento de Matemáticas y le hizo la pregunta clásica: «¿Para qué sirven las matemáticas?». Y obtuvo la respuesta clásica: «Si tienes que preguntarlo, es que te has equivocado de carrera». Aun así, el director le informó de que una posible salida fuera de la enseñanza era la de actuario en las compañías de seguros. La idea de convertirse en un oficinista no sedujo nada a Feynman y decidió apuntarse a ingeniería eléctrica. Pero tampoco le hizo gracia: la encontró demasiado práctica, así que terminó estudiando física.

En el MIT sabían perfectamente qué querían hacer con los departamentos de ciencias. George Eastman, el inventor del rollo fotográfico, había financiado los nuevos laboratorios de física y química, y entre los principales objetivos de investigación estaba el uso de la radiación electromagnética en todo el rango del espectro para extraer los secretos encerrados en el interior de la materia: la época de la espectroscopia a gran escala había empezado. Como complemento a este programa experimental, Stratton y Morse impartían una «Introducción a la Física Teórica» destinada a estudiantes graduados utilizando un texto del propio Slater. Su intención era colocar bajo un mismo paraguas lo que los alumnos habían estudiado en compartimentos estancos durante la carrera, como el electromagnetismo, la termodinámica, la óptica... pero con un único fin: enseñar la moderna teoría atómica, base de la espectroscopia. Entre los pocos que asistían se encontraban dos estudiantes primerizos: Feynman y un joven de Saratoga Springs —una ciudad en el centro del estado de Nueva York—, Theodore A. Welton. No tardaron en hacerse amigos: Welton decía que lo sabía todo sobre la relatividad general de Einstein; Feynman, que había aprendido mecánica cuántica por un libro de un tal Dirac. Los asistentes al curso no tardaron en reconocer que se encontraban ante dos alumnos excepcionales. Fue en ese curso de Introducción a la Física Teórica donde Feynman iba a encontrarse con un pequeño artificio computacional que sería clave en su forma de hacer física. Lo curioso fue que, al contrario que al resto de sus compañeros, la primera vez que lo vio no le gustó ni un pelo.

ÉXODO CIENTÍFICO

Con la llegada al poder del partido nazi en 1933 se inició la diáspora masiva de científicos judíos. Ya desde 1928 la presión antisemita en Alemania se había hecho cada vez más agobiante: a Einstein se le recomendó, por su propia seguridad, que no hiciera apariciones públicas; Arnold Sommerfeld, autor de importantes aportaciones a la teoría cuántica, rompió una pizarra en clase al descubrir que alguien había escrito «¡Malditos judíos!» en ella, y Hans Bethe, el padre de la física nuclear, se encontró dando clases a alumnos que llevaban esvásticas. Al llegar Hitler al poder promulgó una ley por la que prohibía a judíos y a hijos o nietos de judíos desempeñar cargos públicos. Aunque Bethe no se consideraba tal, su madre lo era y perdió su empleo. Como muchos otros, dejó Alemania, marchó a Inglaterra y finalmente recaló en Estados Unidos, más concretamente en Cornell, en febrero de 1935. Al igual que Bethe, muchos científicos europeos subieron a su particular *Mayflower* para instalarse en el Nuevo Mundo. Ese mismo año Feynman dejó su querida Nueva York para estudiar en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Había pedido ingresar en la Universidad de Columbia, en Nueva York, pero fue rechazado. Allí trabajaban tres de los mejores físicos norteamericanos: John C. Slater, Philip M. Morse y Julius A. Stratton.



A partir de 1935, en la Alemania nazi las tiendas con propietarios judíos fueron destrozadas para impedir que la gente comprara en ellas. En los escaparates se lee: ¡Judío!

PRIMER CONTACTO CON EL CAMPO DE LA FÍSICA

En la primavera de 1936 Theodore A. Welton y Feynman estaban deseosos de aprender todo lo que pudieran de la nueva teoría cuántica. Con los pocos textos existentes a su disposición, ambos jóvenes se embarcaron en un programa de autoformación con tal intensidad que en pocos meses fueron capaces de recapitular los agitados años de la revolución cuántica. En una carta fechada el 23 de julio de 1936, Welton escribía:

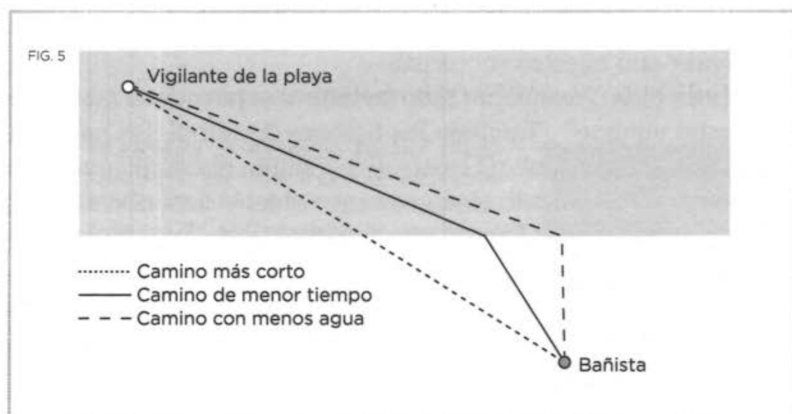
Querido R. P... Me he dado cuenta de que has escrito esta ecuación:

$$\left[(P_\mu - K_\mu)g^{\mu\nu}(P_\mu - K_\mu) + m^2c^2\right]\psi = 0.$$

Lo que acababa de «descubrir» el joven Feynman era la ecuación de Klein-Gordon, una generalización de la ecuación de Schrödinger teniendo en cuenta los efectos relativistas. «¿Por qué no la aplicas al átomo de hidrógeno?», le apremió Welton. Feynman hizo los cálculos, e igual que le pasara a Schrödinger una década antes, descubrió que no servía para hacer predicciones suficientemente correctas. De hecho, la ecuación de Klein-Gordon no es la ecuación válida para describir el comportamiento de los electrones relativistas (cuando se habla de una partícula relativista quiere decir que se mueve a velocidades cercanas a la de la luz), como había demostrado Paul Dirac años antes en un trabajo que le valió el Nobel. Fue una verdadera conmoción para Feynman, pero aprendió que la belleza de una teoría no reside en su elegancia matemática sino en si supera «la prueba del algodón» del mundo real. Sin saberlo, acababa de tener el primer contacto con el campo de la física que le valdría el premio Nobel.

EL SOCORRISTA Y EL BAÑISTA

Imaginemos a uno (o una) de los vigilantes de la playa sentado cómodamente en su silla oteando el océano. De repente ve en su diagonal a un bañista pidiendo ayuda dentro del agua. ¿Cuál es el camino más rápido hasta él? (figura 5). La línea recta es la más corta, como bien sabemos, pero no es la más rápida, porque el socorrista pasaría demasiado tiempo dentro del agua y allí no se desplazaría tan rápido como corriendo por la arena. Quizá sea el camino en el que pasa menos tiempo en el agua (que es justamente aquel que llega hasta la perpendicular a la orilla, justo de-



Para resolver este problema clásico debemos tener en cuenta que el socorrista va más deprisa por la arena que por el agua, luego el camino más rápido se encuentra entre el más corto, la línea recta, y el que pasa el menor tiempo en el agua.

lante del bañista). Sin embargo, así también tardaría demasiado en llegar, pues la distancia extra que debería recorrer por la playa superaría lo que podría ganar al correr más rápido. El camino por el que invertirá menos tiempo es aquel en el que llegue a la orilla con un cierto ángulo y luego tuerza hacia otro más cerrado respecto a la perpendicular a la orilla.

La solución matemática a este problema la obtuvo siglos antes un matemático francés llamado Pierre de Fermat (1601-1665), estableciendo un principio que permitía un acercamiento diferente a los problemas de propagación de la luz: el de tiempo mínimo. Fermat se enfrentaba a un dilema similar al del socorrista: ¿cuál es el camino que sigue la luz cuando pasa de un medio a otro de diferente densidad? Todos hemos podido comprobar cómo una cuchara metida dentro de un vaso con agua parece estar doblada: es el fenómeno de la refracción. En este caso, la luz se comporta igual que nuestro vigilante de la playa: viaja más despacio por el agua que por el aire y por eso se «tuerce». Quien calculó cuánto se desvía la luz de su trayectoria rectilínea al entrar en el agua fue el astrónomo holandés Willebrord Snel van Royen, en 1621, y que hoy todos los estudiantes de instituto aprenden como la ley de Snell (con dos eles, de su nombre latinizado Snellius). Fermat, al enunciar su principio, demostró que la luz cumple la citada ley porque cuando la luz viaja entre dos puntos

recorre el camino en el que invierte el menor tiempo posible, igual que ocurre con nuestro socorrista.

Ahora bien, ¿realmente todo se mueve siguiendo el principio de tiempo mínimo? ¿También los balones de fútbol, las balas de cañón o los asteroides? ¿O existe algo distinto al tiempo que también se minimiza cuando alguno de esos objetos describe una trayectoria determinada? El geómetra francés Pierre-Louis Moreau de Maupertuis descubrió en 1744 una nueva y casi mágica manera de entender el vuelo de una pelota en su camino a la canasta sin tener que usar las leyes del movimiento de Newton. Feynman supo de ella en el instituto, gracias a su profesor de Física, el Sr. Bader:

> Un día me llamó después de la clase de física y me dijo: «Pareces aburrido; quiero contarte algo interesante». Entonces me dijo algo que encontré absolutamente fascinante y, desde entonces, siempre lo encontré fascinante... el principio de mínima acción.

Imaginemos una pelota de baloncesto viajando hacia la canasta. Con las leyes de Newton en la mano podemos calcular cuál será su trayectoria analizando las fuerzas que entran en juego. Con el principio de mínima acción esto no es necesario: solo hace falta mirar la energía que tiene la pelota en cada momento. Sabemos que por estar a una altura del suelo posee energía potencial y por moverse a una velocidad determinada tiene energía cinética. Ahora calculamos, en cada instante, la diferencia entre la energía cinética y la potencial. Una vez hecho, sumamos el resultado que hemos obtenido en cada punto de la trayectoria: lo que tenemos es una cantidad que recibe el nombre de *acción*. Pues bien, el principio de mínima acción asegura que la trayectoria real que seguirá la pelota será aquella en que la acción en cualquier instante tiene siempre el valor más pequeño posible; para cualquier otra trayectoria que imaginemos, el valor de la acción en cada instante será siempre mayor que el de la trayectoria real. Dicho de otro modo, si la luz sigue el camino que hace el tiempo mínimo, una piedra sigue el que hace que los valores de las energías cinética y potencial sean lo más parecidos posibles. Maupertuis, con su vena filosófica, lo expresó más poéticamente: «la naturaleza es económica en todas sus acciones».

LA CONJETURA DE FERMAT



El nombre de Pierre de Fermat (1601-1665) está asociado a una de las afirmaciones más controvertidas de las matemáticas. En 1637 garrapateó una breve nota en los márgenes de su ejemplar de la *Arithmetica* del famoso matemático griego Diofanto de Alejandría (ca. 214-ca. 298). Decía que había encontrado la demostración a un peculiar enigma matemático: no existen tres números enteros que cumplan la ecuación $x^n+y^n=z^n$, para n mayor que 2. Es muy probable que esta afirmación de Fermat fuera un farol, no solo porque se ha tardado 350 años en demostrar (luego no es algo evidente), sino porque esa «demostración realmente admirable» que dijo que era imposible de escribir en el escaso margen de un libro en realidad ocupa 109 páginas en el número 141 de la revista *Annals of Mathematics*, donde apareció en 1995.

Realmente se trata de algo misterioso, pero no menos misterioso que el modo en que a alguien se le pudo ocurrir que esa cantidad totalmente contraintuitiva (las energías de los objetos se suman, no se restan) se podía aplicar al movimiento de los objetos cotidianos. Esa persona fue el francés Joseph-Louis Lagrange, que entre 1772 y 1788 reformuló la mecánica newtoniana, simplificándola. De hecho, demostró que usando el concepto de acción se podían obtener las leyes que formuló Isaac Newton en su gran obra, *Principia Mathematica*. Mejor aún, el uso del lagrangiano (la diferencia entre la energía cinética y la potencial) permite resolver problemas que con el enfoque de Newton son intratables.

A pesar de que al adolescente Feynman el principio de mínima acción le pareciera un concepto fascinante, al universitario le parecía algo horroroso. Su amigo Ted Welton diría tiempo después:

> Feynman se negaba a conceder que Lagrange podía ser útil en física. El resto estábamos impresionados por la elegancia y utilidad de la formulación lagrangiana, pero Dick insistía con tozudez que la verdadera física residía en identificar todas las fuerzas y resolverlas apropiadamente.

La ironía de la vida fue que su gran contribución a la física pasó por adoptar este enfoque que en sus tiempos de estudiante detestó.

UNA REVOLUCIÓN EN CIERNES

El panorama de la física iba cambiando a marchas forzadas. En la primavera de 1938 la boca de los físicos se llenaba con palabras como «fisión nuclear» o «reacción en cadena». Todo el mundo estaba pensando cómo exprimir el potencial energético del núcleo atómico. El MIT decidió ofrecer a sus graduados un seminario sobre la estructura nuclear, que impartiría Morse. Obviamente, no iban a faltar ni Feynman ni Welton. La tensión estaba en el ambiente y todos sabían que en algún lado alguien estaría a punto de demostrar que se podía romper el átomo. No tardó mucho: a finales de ese año los alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann, con la inapreciable ayuda de Lise Meitner, lo consiguieron.

Welton y Feynman volvían a enfrentarse a otro territorio desconocido donde no había ninguna guía. De hecho, no la hubo durante mucho tiempo. Quien quisiera aprender algo de física nuclear debería estudiar los tres monumentales artículos de Hans Bethe publicados en la revista *Reviews of Modern Physics* y conocidos como «la Biblia de Bethe». Al igual que pasara con la ecuación de Klein-Gordon, Feynman se interesaba por un tema que, pocos años más tarde, iba a absorber todo su tiempo: la construcción de la primera bomba de fisión nuclear. Sus profesores estaban tan impresionados con ese joven que recomendaron su graduación en tres años en lugar de los cuatro habituales, pero la universidad denegó la petición. Durante su último año de estudiante Feynman

preparó su primer artículo científico, «Forces in Molecules», publicado en *Physical Review*, se apuntó a cursos de metalurgia, diseñó un curioso artilugio para medir la relación de velocidades de dos ejes en rotación...

Ya cerca de la graduación, en otoño de 1938, el padre de Feynman marchó al MIT para hablar con Morse y preguntarle si realmente Richard era suficientemente bueno. La respuesta del profesor fue rotunda: era el alumno más brillante que jamás había tenido. Melville sintió cómo su deseo de que su hijo fuera científico, ya desde que se encontraba en el vientre de su mujer, se estaba cumpliendo. Pero Feynman tenía que decidir qué hacer cuando terminara. Su intención era quedarse en el MIT, pero su tutor Slater insistió en que debía irse a otro lado, «descubrir cómo es el resto del mundo».

> «Los detalles de la experiencia real se hallan a menudo muy alejados de las leyes fundamentales.»
>
> — Richard Feynman.

La Universidad de Harvard le había ofrecido una plaza por haber ganado la competición matemática William Lowell Putnam, la prueba más prestigiosa en la que participan estudiantes universitarios. En ella nadie resuelve todos los problemas del examen y un porcentaje significativo de estudiantes no llega a resolver ni uno solo. En 1939 la diferencia entre la puntuación de Feynman y la de los demás concursantes era tan exagerada que asombró a los miembros del jurado y le ofrecieron, sin dudar, la posibilidad de ir a Harvard. Pero él la rechazó: había puesto sus ojos en Princeton. ¿La razón? Posiblemente porque Einstein estaba en el Instituto de Estudios Avanzados y quizá porque recordaba que de sus expediciones a la biblioteca en busca de artículos de física, muchos venían de aquella universidad.

CAPÍTULO 2

De Princeton a la bomba atómica

Richard Feynman se encontraba en la cumbre de sus capacidades, preparado para revolucionar la física con sus ideas. De la mano de su director de tesis, el siempre imaginativo John Wheeler, iba a dar los primeros pasos hacia una reformulación completa de la mecánica cuántica. Pero la guerra iba a imponer un *impasse* en su trabajo. No le vino mal, pues le sirvió para templar su innata capacidad para «sentir» la esencia de las ecuaciones, algo que solo unos pocos en toda la historia han podido experimentar.

Cuando en el otoño de 1939 Feynman llegó a Princeton para obtener el doctorado estaba convencido de que trabajaría con uno de los grandes de la teoría cuántica, Eugene Wigner, que se acababa de reincorporar en otoño del año anterior después de dos años en la Universidad de Wisconsin. Este físico y matemático húngaro y futuro premio Nobel tenía una nada disimulada afición: la política. Su preocupación principal era el cada vez más combativo Hitler, inquietud que compartía con su compatriota y colega Leó Szilárd, un hombre del que se dice tenía una rara habilidad para predecir acontecimientos políticos futuros. Según se cuenta, en 1934 detalló los incidentes que llevarían a la Segunda Guerra Mundial. Por ello, y hasta que se instaló en Estados Unidos en 1938, vivía en hoteles siempre con una maleta preparada al alcance de la mano.

Preocupado por los derroteros que estaba llevando el expansionismo alemán, Szilárd pidió a Wigner que le presentara a Albert Einstein. Era el 2 de agosto de 1939 y llevaba el borrador de una carta urgiendo al presidente Franklin D. Roosevelt a comenzar un programa de investigación para obtener la bomba atómica. Con la ayuda de Wigner y del también húngaro Edward Teller —toda una conspiración húngara— convenció a Einstein y ese mismo día el genial físico firmó la famosa carta.

Así estaban las cosas cuando Feynman llegó a Princeton. Pero en lugar de Wigner, le asignaron un nuevo profesor de veintiocho

LOS COMIENZOS DE LA BOMBA ATÓMICA

El físico estadounidense de origen húngaro Leó Szilárd (1898-1964) fue el primer científico que pensó seriamente en construir bombas atómicas. Se le ocurrió tras leer el relato de ciencia ficción de H.G. Wells *The World Set Free*. Había huido a Londres en 1933 evitando la persecución nazi y allí leyó una reseña en el periódico *The Times* de una conferencia dada por Ernest Rutherford en la que rechazaba la posibilidad de poder usar la energía atómica algún día. Esta idea, junto con el pensamiento de que Rutherford se equivocaba, permaneció en su mente. Y, finalmente, la tarde lluviosa y gris del 12 de septiembre, mientras esperaba en un semáforo, tuvo la idea que abriría la puerta a la energía encerrada en el átomo: una reacción en cadena (consiste en que una vez iniciado un determinado proceso, se mantiene e incluso puede aumentar su ritmo hasta descontrolarse). En su primer intento de generar una reacción nuclear en cadena Szilárd utilizó berilio e indio, pero no lo consiguió (no la producen). Durante 1936 cedió la patente de la reacción al almirantazgo británico para asegurar el secreto. En 1938 aceptó la oferta de la Universidad de Columbia de seguir realizando allí sus investigaciones y se mudó a Nueva York, donde se puso en contacto con el físico italiano Enrico Fermi justo en el momento en que los alemanes Hahn y Strassmann anunciaban la primera fisión nuclear. Fermi y Szilárd se habían dado cuenta de que el uranio podía mantener una reacción en cadena y lo demostraron experimentalmente al año siguiente. Al apagar los instrumentos y marchar a sus casas, Szilárd tuvo su propia epifanía: «Esa noche tuve muy pocas dudas de que el mundo se dirigía a sus horas más dolorosas».



Leó Szilárd, probablemente el primer científico que pensó seriamente en construir bombas atómicas.

años que se había incorporado a la universidad el año anterior: John Archibald Wheeler. Princeton lo había contratado, al igual que a Wigner, para impulsar el programa de física nuclear. Catalogado por sus colegas como una mente monstruosa, fue mentor y

maestro de una generación de físicos que han destacado por sus contribuciones a la cosmología y la relatividad; fue quien dio nombre a los agujeros negros y dirigió cincuenta tesis doctorales, lo que tratándose de un físico teórico supone una cantidad enorme.

En 1939 Wheeler era un joven profesor de ojos grises, con maneras y ropa de *gentleman*. Feynman era su profesor ayudante y le sustituía cuando se ausentaba, primero en las clases de mecánica y luego en las de física nuclear. Semanalmente se reunían para enfocar y revisar su trabajo de investigación. Poco a poco esa relación tutor-estudiante fue convirtiéndose en una relación de colegas en un momento en que la física de partículas no disfrutaba de la popularidad que tendría décadas más tarde. De hecho, para el congreso de física teórica que se iba a celebrar en Washington en 1940 los organizadores barajaban dos posibilidades: partículas elementales o el interior de la Tierra. Se decantaron por esta última.

Con todo, Feynman sabía que estaba ante un terreno que prometía mucho. Cuando leyó el libro de mecánica cuántica de Dirac, descubrió que había un pensamiento que impregnaba todo el texto: había demasiadas incógnitas y se necesitan nuevas ideas. Dirac y otros pioneros de la electrodinámica cuántica (la rama que estudia la relación entre la electricidad, el magnetismo, la luz y la materia) habían llegado tan lejos como habían podido, pero la teoría seguía incompleta. Ése sería el camino que iba a tomar Feynman.

UN CAMINO INACABADO

La teoría cuántica había conocido sus años dorados entre 1924 y 1927, pero todavía quedaba mucho por hacer. No se entendía muy bien cómo manejar las relaciones de incertidumbre obtenidas por Heisenberg, ni tampoco qué hacer con las ondas de materia de De Broglie, ni mucho menos cómo incorporar la relatividad de Einstein a este cuadro complejo.

El lunes 24 de octubre de 1927 comenzó en el Instituto de Fisiología de Bruselas el quinto Congreso Solvay (cuyo tema principal fue «Electrones y Fotones»), el más importante de la historia

reciente de la física: diecisiete de los veintinueve asistentes al congreso (se acudía exclusivamente por invitación) eran o serían premio Nobel. El título no reflejaba la verdadera intención de esta reunión: dirimir el camino al que llevaba la teoría cuántica. Y, como apostillaría Bohr, «para ver cuál era su reacción [de Einstein] a los últimos avances realizados». Fue aquí donde Einstein, a quien le repelía la naturaleza probabilística del mundo, dijo su famosa frase «Dios no juega a los dados». Bohr le replicó: «Deja de decirle a Dios lo que tiene que hacer».

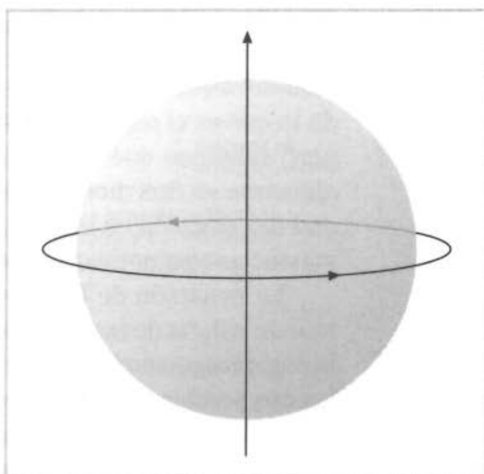
«Ni siquiera la propia naturaleza sabe qué camino va a seguir el electrón.»

— Richard Feynman.

A esta mítica reunión acudió un joven físico británico de veinticinco años, Paul Adrien Maurice Dirac. Las largas discusiones filosóficas sobre cómo interpretar la teoría cuántica le habían dejado totalmente frío. Y conseguirlo era bien difícil, pues Dirac era el arquetipo del académico inglés silencioso e introvertido. Extremadamente callado y taciturno (sus amigos acuñaron el *dirac* como la unidad mínima de palabras que se pueden decir en una conversación), trabajaba en solitario todos los días de la semana, excepto el domingo que salía a pasear... solo. En 1926 había unificado en una misma formulación la mecánica ondulatoria de Schrödinger con la matricial de Heisenberg, pero él sentía que debía hacer algo original. Fascinado como estaba por la relatividad einsteniana, decidió que su siguiente objetivo era obtener una formulación relativista para la mecánica cuántica. Lo había intentado, y fracasado, los dos años anteriores. En el Congreso Solvay le comentó sus intenciones a Bohr y este le contestó que Klein ya lo había resuelto. Dirac sabía que no era así pero no se lo pudo explicar, pues la siguiente conferencia que iban a escuchar acababa de empezar.

La conversación con Bohr le convenció de lo urgente que era encontrar una ecuación válida. Dirac era primero matemático y luego físico, así que se enfrentó a la situación como si tuviera que

resolver un problema matemático: la interpretación física ya la buscaría después. El reto consistía en que, si se tenía que incluir la relatividad especial, el tiempo debería entrar en la ecuación en pie de igualdad con las tres dimensiones espaciales (x, y, z; o largo, alto y ancho): sería la cuarta dimensión. En la ecuación de Schrödinger el tiempo no tiene el mismo tratamiento que las coordenadas espaciales, lo que la convierte en una ecuación no-relativista. La ecuación de Klein-Gordon cumplía esa condición, pero hacía aguas a la hora de explicar el espectro del átomo de hidrógeno. Además, en ella no aparecía por ningún lado una nueva característica de los electrones que el físico austriaco Wolfgang Pauli —un genio que a la tierna edad de dieciocho años era un experto en relatividad— había postulado para explicar ciertos resultados experimentales obtenidos por Otto Stern y Walther Gerlach en 1922: el espín (véase la figura). Para visualizarlo, los físicos imaginaron que si el electrón era una pequeña esfera cargada, entonces podría rotar sobre sí mismo como hacen los planetas: eso era el espín. Pero aquí termina la analogía; si bien el giro de un planeta puede tener cualquier valor, el espín del electrón solo puede tomar dos, que se asignan arbitrariamente como +½ y -½.



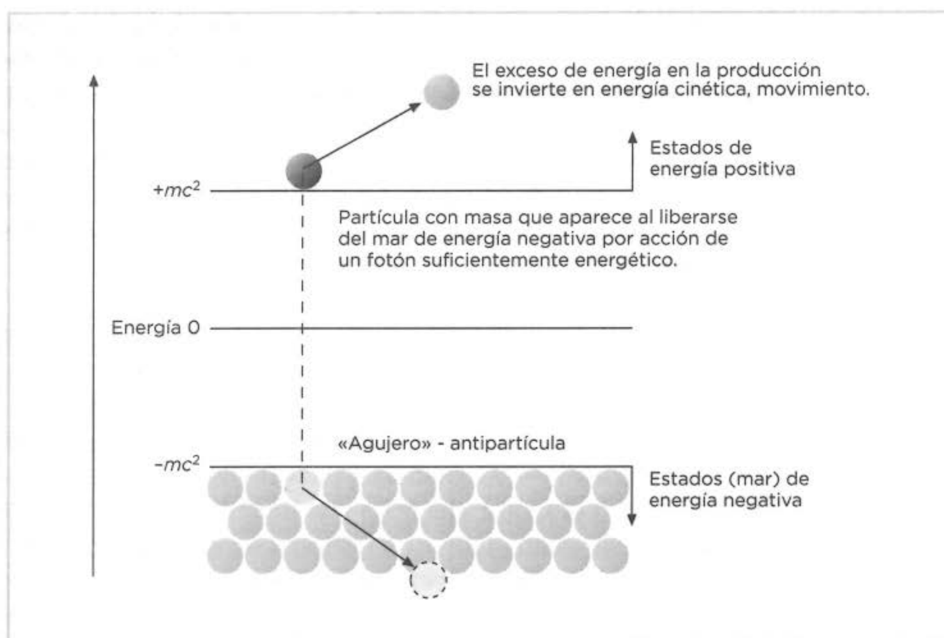
El espín suele explicarse (erróneamente) como el sentido de rotación de una partícula subatómica. Sin embargo, estamos ante una propiedad exclusivamente relativista, no clásica.

Gracias a un uso creativo de las matemáticas Dirac obtuvo la primera ecuación que unificaba las dos grandes teorías de comienzos del siglo XX. Fue todo un *tour-de-force*, un triunfo conceptual. Al introducir un espacio-tiempo cuatridimensional en la teoría cuántica obtuvo de manera natural un cuarto grado de libertad del electrón que, sin mucho esfuerzo, Dirac identificó con el espín. Fuera lo que fuera el espín, de ningún modo se correspondía con una rotación del electrón. Se trataba de un resultado exclusivamente cuántico-relativista, sin paralelo alguno con la física clásica. En ese sentido era y es absolutamente diferente a otras

propiedades del electrón, como su momento angular orbital, que se podía relacionar con la cantidad física que describe la traslación del electrón alrededor del núcleo atómico. La interpretación de lo que es el espín sigue siendo oscura incluso en la actualidad, pero sabemos que en presencia de un campo magnético puede alinearse en dos direcciones: arriba y abajo. Esta extraña propiedad del electrón es la que permite que, por ejemplo, se hagan resonancias magnéticas en los hospitales.

La ecuación de Dirac se extendió como la pólvora y todo el mundo estaba de acuerdo en que era *la* solución (véase la figura de la página siguiente). Sin embargo, había un pequeño inconveniente: las dos posibles orientaciones del espín del electrón que había obtenido Dirac eran la mitad de las soluciones. Había otras dos que se correspondían con unos misteriosos estados del electrón de energía negativa. Lo que estas soluciones «de más» significaban era que el electrón podía saltar de su estado normal de energía positiva y carga eléctrica negativa a otro de energía negativa y carga eléctrica positiva. Nadie había observado semejante transición y arrojaba serias dudas sobre la validez de la ecuación de Dirac. Bohr escribió en 1928: «Dirac estuvo aquí [Leipzig, junio de 1928] y dio una bonita charla sobre su ingeniosa teoría. Sin embargo no tiene más idea que nosotros de cómo deshacerse del problema $+e \rightarrow -e$».

Dirac lidió con el problema durante dos años hasta que en diciembre de 1929 perfiló una solución. Él partía de la suposición de que en el universo tenemos un mar de energía negativa totalmente ocupado por electrones. No hay forma de saber que están ahí porque no interaccionan con nada: son como el telón de fondo de un teatro sobre el que se mueven los actores, el mundo de la energía positiva que sí podemos medir. Pero puede darse el caso que uno de esos electrones que pueblan ese mar «salte» y podamos observarlo, dejando tras de sí un «agujero» de energía negativa. ¿Cómo veríamos ese hueco? Este era el punto fundamental de la interpretación de Dirac. En nuestros instrumentos de medición aparecería como una partícula con carga eléctrica positiva. Dirac primero pensó que su aspecto sería el del protón, pero sus colegas le señalaron que el electrón tenía una masa 2000 veces más pequeña, luego era imposible que al saltar del mar de energía



El «mar de energía» negativa de Dirac que explica la existencia de la antimateria.

negativa dejara tras de sí un hueco 2000 veces más pesado. Dirac reconoció su equivocación y en 1931 admitió que el «agujero» debería tener la misma masa que el electrón pero con carga eléctrica positiva: «[Estamos ante] un nuevo tipo de partícula, desconocida para la física, que tiene la misma masa que el electrón pero de carga opuesta». En 1932 el físico norteamericano Carl David Anderson encontró esa misteriosa partícula: el positrón, la antipartícula del electrón. Semejante descubrimiento significó un importante espaldarazo a la ecuación de Dirac y una de las grandes predicciones de la mecánica cuántica relativista.

No obstante la ecuación de Dirac no representó una unificación completa de la relatividad y la teoría cuántica, ya que no describía lo que sucede cuando un electrón choca con un fotón, ni tampoco el proceso de aniquilación de un positrón cuando se encuentra con un electrón, que produce dos o tres fotones de luz de muy alta energía. Curiosamente, estas objeciones ya habían sido resueltas por el propio Dirac antes de inventar su ecuación. Pero,

para entenderlo, debemos viajar hacia atrás en el tiempo, exactamente a mediados del siglo XIX, para encontrarnos con uno de los mejores físicos experimentales de la historia, el británico Michael Faraday (1791-1867).

UN CAMPO QUE LLENA EL ESPACIO

Los logros de Faraday, hijo de un hombre sin recursos y cuyo aprendizaje consistió en leer todos los libros que caían en sus manos durante los siete años que fue aprendiz de encuadernador, son impresionantes: descubrió las distintas relaciones que hay entre la electricidad y el magnetismo, puso las bases de la electroquímica, inventó el motor eléctrico y la dinamo... Todo, siendo casi un analfabeto matemático: no utilizaba ecuaciones ni fórmulas para describir sus descubrimientos, lo hacía utilizando el lenguaje de la calle. Pero el gran avance conceptual de Faraday fue la introducción del concepto de *campo*. Hasta ese momento, no había forma de explicar por qué la manzana caía del árbol o la Tierra daba vueltas alrededor del Sol. Newton había dicho cómo era la fuerza de la gravedad, pero no cómo funcionaba: era como si el Sol ejerciese una misteriosa acción a distancia sobre los planetas, de forma prácticamente instantánea. Esta idea era tan absurda que muy pocos la aceptaban. Pero la ley de gravitación universal funcionaba, así que los físicos aparcaron el problema en un rincón oscuro, hasta que Faraday empezó a hablar de campos.

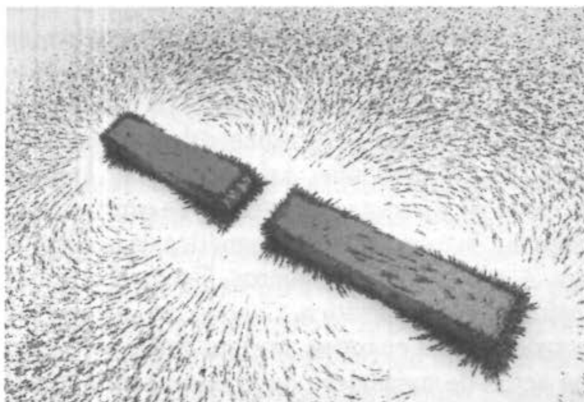
Nosotros no nos damos cuenta, pero el espacio que nos rodea no está ocupado solamente por la materia. Si pudiéramos sacar toda la materia que existe en un dormitorio, hasta la última mota de polvo y la última molécula de aire, no podríamos decir que en esa habitación no hay nada. La prueba palpable es que si lanzamos una pera, esta caerá al suelo: luego en nuestra habitación hay «algo» que la hace caer. No importa el lugar en el que la soltemos: la pera irá directa al suelo desde cualquier punto de la habitación; está llena de algo que llamamos gravedad. Esto es, y dicho más correctamente, en nuestro dormitorio hay un campo gravitatorio.

¿Cuál es la causa de que esté ahí? Evidentemente, el planeta que tenemos bajo nuestros pies.

Pero no solo eso. Si lanzamos en línea recta una partícula con carga eléctrica, como un electrón, y analizamos con cuidado su trayectoria, podremos distinguir que, al igual que pasó con la pera, «algo» modifica su camino, y no es la gravedad. Si repetimos muchas veces el experimento nos daremos cuenta de que ese «algo»

LIMADURAS DE HIERRO E IMANES

Lo que habitualmente llamamos *fuerza* (ya sea gravitatoria, eléctrica o magnética) no es otra cosa que el efecto visible sobre la materia de un campo que llena el espacio. Y más importante aún: la materia posee diferentes propiedades (en nuestro caso hemos descubierto dos: la masa y la carga) que la hacen sensible a los diferentes campos; si no posee alguna de ellas (por ejemplo, si su carga eléctrica es cero), el campo correspondiente no le influye, es como si no existiera. Faraday puso de manifiesto la existencia de esos campos con un experimento muy común en la escuela: echamos limaduras de hierro sobre un papel y debajo ponemos un imán. A los pocos segundos estas se organizan formando un patrón característico. Si quitamos el imán y movemos un poco el papel, la peculiar estructura desaparece, lo que significa que, mientras estuvo el imán, el campo magnético que generaba modificó las propiedades del espacio.



Al colocar las limaduras de hierro junto a un imán, estas se organizan a su alrededor, poniendo de relieve la existencia de un campo magnético en esa región del espacio.

solo influye en las partículas que tienen carga eléctrica; las neutras «no se enteran de nada». Acabamos de descubrir que existe otro campo, el electromagnético, que únicamente afecta a las partículas con carga. ¿Cuál es su origen? Una suma de distintas situaciones: el magnetismo terrestre, los campos electromagnéticos producidos por las antenas de telefonía móvil, los televisores, las emisoras de radio, el cableado de la casa, los electrodomésticos de la cocina...

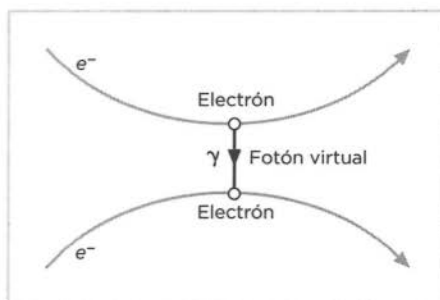
«Una luz muy tenue solo significa pocos fotones.
Ver los electrones implica modificarlos.»

— Richard Feynman.

Volvamos de nuevo con Dirac. Su ecuación describía el comportamiento de un electrón moviéndose por un campo electromagnético clásico. Si se quiere tener un cuadro completo y total de lo que sucede a nivel microscópico es necesario cuantizar el campo electromagnético. En la física clásica los campos son continuos: la gravedad alrededor de la Tierra es un conjunto continuo de números, que se corresponde con el valor de la fuerza gravitatoria, calculada con la fórmula descubierta por Newton, en cada punto matemático del espacio.

Ahora bien, el término «cuanto» significa discreto, y del mismo modo que la radiación electromagnética está compuesta por fotones, el campo electromagnético debe poder «trocearse» hasta una cantidad mínima. A esta parte Dirac la llamó la «segunda cuantización» y dio origen a la electrodinámica cuántica. Lo que hizo Dirac en 1927 fue encontrar un aparato matemático capaz de dar ese paso. Al aplicarlo al campo electromagnético descubrió que se convertía en un mar de partículas. Así pues, por un lado tenemos partículas de materia, y por otro, partículas de campo, las responsables de transmitir la fuerza electromagnética de una partícula de materia a otra. Actúan como mensajeros, llevando la información de la interacción electromagnética. Cuando dos electrones se repelen, la electrodinámica cuántica dice que entre ellos media una partícula que actúa de mensajero de la interacción; la repulsión eléctrica de los electrones no es otra cosa que un intercambio de las partículas que componen el campo electromagnético. La situa-

ción es similar a dos patinadores sobre hielo que, al cruzarse, se lanzan una pelota medicinal (una bola pesada). Por el simple hecho de hacerlo, cambian su dirección de movimiento justo en el momento del intercambio; eso es lo que nosotros percibimos como repulsión eléctrica entre los electrones.



La repulsión electrostática entre dos electrones se debe, según la electrodinámica cuántica, a que se intercambian un fotón.

Si los patinadores son electrones, ¿qué es la pelota? Un fotón (salvo por el hecho de que los fotones no tienen masa): esta es la partícula mediadora en la interacción electromagnética. Según la electrodinámica cuántica, el campo electromagnético es un conjunto infinito de fotones donde cada uno de ellos se comporta como un oscilador armónico, un muelle. Como en el caso del mar de electrones de la antimateria, estos fotones se encuentran por todo el espacio, pero permanecen invisibles a nuestro ojo o a cualquier otro detector; por ello reciben el nombre de *fotones virtuales* (véase la figura). Solo sabemos de su existencia de manera indirecta, por el efecto que provocan cuando dos partículas con carga eléctrica interaccionan entre sí.

LOS PROBLEMAS DEL ELECTRÓN

Nunca una partícula tan pequeña ha provocado tanto dolor de cabeza. El electrón daba problemas incluso en el relativamente tranquilo mundo de la física clásica. Sabemos que es una partícula cargada, ¿pero tiene tamaño? Si consideramos que su aspecto es el de una pelota pequeña, ¿qué hace para que no se desintegre debido a la repulsión eléctrica que debe aparecer entre las distintas partes de esa diminuta esfera? Si no sabemos cómo responder podríamos decidir que, en realidad, un electrón es un punto sin dimensiones. Tampoco es la solución, pues al no tener dimensiones las ecuaciones del electromagnetismo empiezan a plagarse de divisiones por cero: el infinito entra en escena y cuando eso su-

cede es señal de que algo anda mal en la teoría. El problema de la autoenergía del electrón, debida a la interacción de él mismo con su propio campo, es un problema sin solución.

En 1929 Heisenberg y Pauli consideraron este problema desde el punto de vista cuántico descubriendo, con horror, que el problema tampoco se solucionaba: la autoenergía del electrón era infinita. Esto era debido a que en la electrodinámica cuántica un electrón no es solo una partícula, sino que va acompañado de una nube de fotones virtuales que aparecen y desaparecen, esto es, fotones que el propio electrón emite y reabsorbe antes de que tengamos tiempo de detectarlos. Y como las relaciones de incertidumbre de Heisenberg permiten que el electrón emita fotones con una energía todo lo grande que queramos...

Luego tenemos una teoría que nos permite hacer cálculos detallados de lo que sucede cuando un electrón y un fotón interaccionan, como en el caso de la autoenergía del electrón, pero al hacerlo aparecen infinitos por todos lados. Los físicos estaban desesperados, pues no entendían qué hacer con ello; el otrora brillante Heisenberg abandonó el tema y se dedicó a estudiar la ferroelectricidad —que, a pesar de su nombre, nada tiene que ver con el hierro, sino con materiales aislantes—.

Feynman había estado dándole vueltas a este problema mientras todavía era estudiante en el MIT. En el otoño de 1940 volvió a la carga y se planteó: ¿Por qué no eliminar estos infinitos prohibiendo que el electrón interaccione consigo mismo? Incluso pensó algo más atrevido: ¿Y si lo que llamamos campo electromagnético, causado por el intercambio virtual de fotones, fuera una ficción? ¿No podría ser el electromagnetismo nada más que la interacción entre partículas cargadas, sin ningún campo de por medio? Como dijo en su discurso de aceptación del premio Nobel:

> Me parecía evidente que la idea de una partícula actuando sobre sí misma no era necesaria; era algo estúpido. Así que pensé que los electrones no podían actuar sobre sí mismos, solo lo podían hacer con otros electrones. Esto significaba que no había ningún campo. Lo que había era una interacción directa entre cargas, si bien es cierto que con un retraso.

Realmente eran ideas muy arriesgadas, y nadie mejor que Wheeler para hacer caso de ellas. No podían formar una pareja mejor. En cuestión de explorar nuevos caminos para la física ambos eran de los que se lanzaban sin red.

«Me importan un bledo los torpedos. ¡A toda máquina!»

— Palabras de Feynman a un posible estudiante de física, recordando la frase atribuida al almirante estadounidense David Farragut durante la Guerra de Secesión.

Feynman sabía que su idea tenía una importante falla: la resistencia de radiación. Cuando se acelera una partícula cargada, esta emite radiación y pierde energía. Por este motivo el modelo de átomo de Rutherford era imposible desde el punto de vista del electromagnetismo clásico: un electrón dando vueltas alrededor del átomo está sujeto a una aceleración centrípeta, lo que obligó a Bohr a introducir el concepto de órbita cuantizada. Es esa resistencia de radiación la que obliga a usar una cantidad de energía extra en las antenas de las emisoras de radio y televisión si queremos que se escuche un programa, porque parte de la potencia suministrada a la antena se pierde en forma de calor.

La resistencia de radiación también es el motivo por el que si queremos acelerar un electrón en el vacío tendremos que usar más energía que en el caso de que no tuviera carga. Al estar en el vacío, sin nadie alrededor, implica que se trata de una interacción del electrón consigo mismo, un efecto totalmente similar al de la autoenergía. Pero, si existiera un único electrón en el universo, ¿emitiría radiación? ¿Y si la existencia de la resistencia de radiación exigiera la existencia de otra partícula? Feynman consideró esta idea suponiendo un universo en el que solo existen dos electrones. Supongamos que el primero se pone a oscilar. Esto hace que, según las reglas del electromagnetismo, aparezca una fuerza sobre el segundo, que le obliga a ponerse a oscilar, lo que implica que ejerce una fuerza sobre el primero. ¿Podría esta situación explicar la resistencia de radiación?

A Wheeler le encantó esta idea, pero rápidamente vio un importante impedimento: si la idea de Feynman era correcta, la

resistencia de radiación debía depender de cosas como la distribución de cargas en el universo y de su valor, pero no era así. Es más, Feynman no había tenido en cuenta el retraso obligado en la transmisión de esa fuerza, pues según la relatividad nada puede viajar más deprisa que la luz. Había cometido un error de principiante al creer, como se pensaba en tiempos de Newton, que las fuerzas se transmitían instantáneamente por todo el universo. Pero entonces Wheeler propuso una idea aún más loca: ¿Y si la fuerza electromagnética ejercida por la segunda partícula, de algún modo, aparecía porque viajaba hacia atrás en el tiempo? Era una propuesta más propia de la ciencia ficción que de la física, pero lo importante de este planteamiento es que las leyes del electromagnetismo permiten tanto la existencia de ondas que se emiten antes de ser absorbidas (ondas retardadas) como ondas que se absorben antes de ser emitidas (ondas adelantadas). O sea, que no había ningún impedimento en las ecuaciones para que eso fuera así. La única objeción es puramente filosófica: los físicos tienen un alto aprecio por el principio de causalidad según el cual la causa debe preceder al efecto, el tren debe partir de la estación de salida antes de entrar en la de llegada, el balón entra en la portería después de que el delantero chute, y no al revés. La propuesta de Wheeler hacía que, al mover una carga, ahora se ponía en movimiento otra carga un poco antes.

Este es uno de los misterios más curiosos de la física. Las leyes de la mecánica y el electromagnetismo son simétricas en la coordenada temporal: si de repente la flecha del tiempo se invirtiera, las leyes serían las mismas. Esta *invariancia temporal* de las leyes fundamentales de la física no tiene su reflejo en el mundo real, donde somos capaces de distinguir el pasado del futuro. Ahora bien, ¿no es posible que un electrón emitiese su radiación tanto hacia el futuro (ondas retardadas) como al pasado (ondas adelantadas), lo mismo que un faro ilumina en una dirección y en la contraria? Estimulados por esta posibilidad, se dedicaron a calcular en la pizarra del despacho de Wheeler si era físicamente posible. Después de una hora no encontraron nada que lo impidiese.

Feynman trabajó duro, pues el planteamiento de Wheeler exigía gran cantidad de cálculos muy complicados. Poco a poco fue

apareciendo un modelo que ya no era el de dos únicos electrones, sino un sistema donde había un electrón y una multitud de otras partículas alrededor: «Todo resultó muy bien; todo encajaba perfectamente». Lo que acababan de desarrollar era una teoría clásica, no cuántica, y la bautizaron como «la teoría de los potenciales semiadelantados y semirretrasados». El siguiente paso era obvio:

> Calculamos que si lográbamos librarnos de tal dificultad [la autoenergía del electrón] en el contexto de la física clásica, y a partir de la teoría clásica construir una teoría cuántica, seguramente nos sería posible también enderezar la teoría cuántica.

Mas la añorada teoría cuántica de los potenciales semiadelantados y semirretardados nunca vio la luz: ninguno de los dos fue capaz de elaborarla. Una década más tarde Feynman escribió a Wheeler: «Creo que nos equivocamos en 1941. ¿Estás de acuerdo?». No tenemos constancia de la respuesta de su mentor y amigo.

UNA TESIS Y UNA MUJER

Si hubo una persona que influyera más que nadie en la vida de Feynman, esa fue Arline Greenbaum. Richard se enamoró de ella siendo un adolescente y ese amor se mantuvo durante todos los años que estuvieron juntos. Arline era una joven con talento musical y artístico: tocaba el piano, cantaba, dibujaba y sabía mantener una conversación interesante sobre literatura y arte. Por el contrario, a Richard el arte le importaba más bien poco y la música de cualquier tipo le ponía de los nervios a pesar de que tenía sentido del ritmo: su tamborileo continuo e inconsciente en todas las superficies posibles había enervado a sus compañeros de cuarto en el MIT.

En Princeton su relación fue madurando y profundizándose. Arline conocía bien a Richard y tenía la rara habilidad de hacerle pasar vergüenza: conocía sus pequeñas vanidades y era inmiseri-

corde cuando le pillaba preocupado por las opiniones de los demás: «¿Qué te importa lo que piensen los demás?», le repetía una y otra vez. ¿Acaso él no se enorgullecía de su honestidad e independencia? Pero la sensibilidad de Arline no tenía reflejo en Feynman.

A medida que Feynman progresaba en su trabajo, Arline le visitaba cada vez con mayor frecuencia. Las cartas que se escribieron hablaban claramente de sus sentimientos, de sus ingenuas esperanzas en el futuro y el deseo de construirlo juntos independientemente de los obstáculos que encontrasen. Pero en una de ellas, fechada el 3 de junio de 1941, Arline apuntaba que algo no iba bien. Solía aparecerle un bulto en el cuello acompañado de una fiebre inexplicable:

> Mañana el doctor Treves va a venir y darme algunas noticias... Lo aceptaré pero Nan escribió y dijo que yo tenía derecho a acudir a otro doctor para verificar el diagnóstico y dejar que examine los cortes de la biopsia.

Mientras esto sucedía, Feynman y Wheeler seguían empeñados en encontrar una formulación cuántica a su teoría. El principal problema era que una teoría tan «exótica» requería unas formulaciones matemáticas que no encajaban bien en la mecánica cuántica. El problema estaba en las interacciones entre partículas en tiempos diferentes: «La trayectoria de una partícula en un momento dado se ve afectada por la trayectoria de otra en otro momento». La forma de trabajar estándar en mecánica cuántica no permitía este tipo de florituras. En ella, el paso del tiempo está perfectamente controlado: si se conoce el estado de un sistema en un momento determinado, las ecuaciones describen la evolución de ese sistema a lo largo del tiempo. Pero la electrodinámica de Feynman y Wheeler exigía conocer las posiciones y movimientos de muchas partículas en muchos momentos diferentes para poder determinar el estado de una sola partícula. Mucho perro para ese hueso.

Durante el otoño e invierno de 1941 a 1942 Feynman trabajó duramente para encontrar una manera de reformular la mecánica cuántica para que pudiera encajar con su teoría. Y entre las posibilidades que descubrió apareció una con la que ya se había en-

contrado: el formalismo de Lagrange y el principio de mínima acción. El punto crucial de este enfoque era que no había que prestar atención a lo que sucedía en un momento determinado, como pasaba en la mecánica cuántica estándar, sino en un intervalo de tiempo. Recordemos que, en esencia, consiste en tener en cuenta todos los posibles caminos que llevan a una partícula de un punto a otro y determinar cuál de ellos es el que tiene el valor medio más pequeño de la acción. Los cálculos de Feynman le mostraron que podía reescribir la teoría desarrollada con Wheeler usando este principio, pues con él podían observar el camino de una partícula a vista de pájaro, como si fuera un todo: «Tenemos algo que describe el carácter de la trayectoria a través de todo el espacio-tiempo». ¿Cómo podía trasladar todo esto al lenguaje de la mecánica cuántica? Para entenderlo, debemos hacer una pequeña digresión sobre ciertas sutilidades de la teoría.

«Si hay una enfermedad cuyo síntoma sea la creencia en la capacidad de la lógica para controlar los caprichos de la vida, afectaba a Feynman junto con sus problemas digestivos crónicos.»

— James Gleick en su biografía sobre Richard Feynman.

La función de onda que describe el comportamiento de una partícula subatómica —que se obtiene resolviendo la ecuación de Schrödinger— da cuenta de que todas las partículas también se comportan, de algún modo, como ondas en un estanque. Esto quiere decir que pueden experimentar los fenómenos ondulatorios como la difracción o la superposición. Ahora bien, la cuestión fundamental que se esconde tras la función de onda es que no describe la partícula en sí misma, sino la probabilidad de encontrar esa partícula en un lugar determinado: si la función de onda no vale cero en distintos sitios (y puede tomar tanto valores positivos como negativos), la partícula actúa como si estuviera en muchos lugares a la vez. Lo que hacen las ecuaciones de la mecánica cuántica es determinar cómo va a evolucionar en el tiempo esa función de onda; o, lo que es lo mismo, cómo van a cambiar con el tiempo ese conjunto de probabilidades de encontrar a la partí-

cula en un lugar determinado. Ahora bien, hay un detalle crucial y muy sutil que explica por qué esas partículas parecen comportarse como ondas: ese conjunto de probabilidades no queda definido por la función de ondas en sí, sino por su cuadrado.

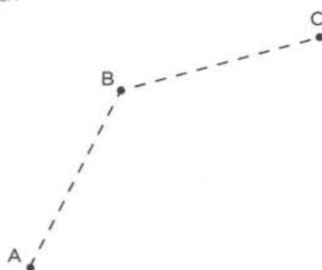
«La mecánica cuántica describe la naturaleza como algo absurdo al sentido común.»

— Richard Feynman.

Para comprobar las consecuencias tan extrañas a las que esto nos conduce, supongamos que queremos determinar la probabilidad de encontrar dos partículas, A y B, en una caja. La teoría cuántica nos asegura que la función de onda del sistema es la suma de las funciones de onda de cada una de las partículas. Supongamos que el valor que toma la función de onda de A dentro de la caja es ½ y la de B, –½. Si solo estuviera A, la probabilidad de encontrarla en la caja sería el valor de la función de onda al cuadrado, o sea $(½)^2 = ¼$. En el caso de que solo existiera B, sería $(–½)^2 = ¼$. Ahora viene lo sorprendente. Como tenemos dos partículas, la probabilidad de encontrar alguna de ellas es la suma de los valores de la función de onda de cada partícula al cuadrado, $[(½) + (–½)]^2$. ¡El resultado es cero! ¿Se aprecia lo ridículo de la situación? Si solo tuviésemos una de ellas, habría un cuarto de posibilidades de encontrarla en la caja. Pero si lo que tenemos son las dos, jamás estarán dentro. Pensándolo detenidamente, lo que aquí tenemos es el fenómeno de interferencia de las ondas que ya se ha tratado en el experimento de la doble rendija. Como las partículas pueden presentar propiedades ondulatorias, pueden interferirse entre sí.

Apliquemos esto mismo a los caminos que puede tomar una partícula. Pero primero veamos cómo calculamos esas probabilidades en el mundo clásico de los coches y las motos. Imaginemos que queremos viajar de A hasta C pasando por B (figura 1). La probabilidad de tomar ese camino concreto será la de ir de A hasta B multiplicada por la de ir de B hasta C: P(ABC) = P(AB) × P(BC). Por el contrario, la probabilidad de ir de A hasta C por cualquier camino (figura 2) es la suma de todas las probabilidades P(ABC)

de los caminos que pasan por *cualquier* B. Así, si suponemos que solo hay tres maneras de llegar a C (B_1, B_2, B_3) la probabilidad sería $P(AC) = P(AB_1C) + P(AB_2C) + P(AB_3C)$. Sin embargo, las cosas no funcionan así en la mecánica cuántica por culpa de la necesidad de elevar al cuadrado la función de onda para calcular las probabilidades.



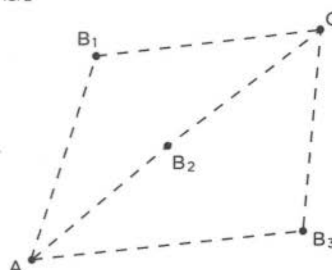


FIGURA 1: **Camino de A a C pasando por B.**

FIGURA 2: **Camino de A a C pasando por todos los posibles B: B_1, B_2, B_3.**

En el primer caso, lo que debemos hacer es multiplicar las funciones de onda correspondientes a cada etapa del camino y luego elevar al cuadrado. En el segundo, como sucedía con las partículas en una caja, deberemos sumar las funciones de onda —que también reciben el nombre de *amplitudes de probabilidad*— de cada uno de los caminos y luego elevar el resultado al cuadrado. Pues bien, lo que Feynman se preguntaba a finales de 1941 era si podía describir el formalismo de la mecánica cuántica como *caminos asociados a amplitudes de probabilidad* en lugar de hacerlo como se estaba haciendo hasta entonces, exclusivamente con amplitudes de probabilidad.

La manera que tenían los físicos de describir un sistema cuántico era «encontrando el hamiltoniano» (un objeto matemático que está relacionado con la energía total del sistema), pues una vez determinado, solo había que ponerse a calcular; este método no tenía cabida en el mundo de los retrasos temporales de Wheeler y Feynman. La única posibilidad de éxito residía en encontrar una manera de implementar el formalismo lagrangiano y el principio de mínima acción. Si no lo conseguían, todo habría sido inútil. ¿Pero cómo hacerlo? La respuesta le llegó durante una fiesta de la cerveza en la taberna Nassau de Princeton. Ese día Feynman se sentó junto a Herbert Jehle, un antiguo estudiante de Schrödinger, y le preguntó si sabía de alguien que hubiera aplicado alguna vez el principio de mínima acción a la mecánica

cuántica. La cara se le iluminó cuando Jehle le contestó que Dirac, uno de sus héroes, había escrito un artículo sobre el tema hacía ocho años.

EL PRINCIPIO DE MÍNIMA ACCIÓN CUÁNTICO

Al día siguiente Feynman y Jehle fueron juntos a la biblioteca. Lo encontraron entre las páginas de una revista poco leída, *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*. Su título lo decía todo: «El lagrangiano en la mecánica cuántica». Dirac sugería que esta formulación podía ser muy fecunda a la hora de producir resultados porque usaba el principio de mínima acción y porque el lagrangiano podía incorporar de manera sencilla los resultados de la relatividad especial de Einstein.

«No hemos encontrado nada equivocado en la teoría de la electrodinámica cuántica. Por tanto, yo diría que es la joya de la física, la posesión de la que estamos más orgullosos.»

— RICHARD FEYNMAN EN *ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA: LA EXTRAÑA TEORÍA DE LA LUZ Y LA MATERIA* (1954).

En el artículo Dirac atacaba el problema del modo que Feynman estaba buscando, calculando la probabilidad a lo largo de todo el camino de una partícula. Pero no había profundizado mucho, únicamente había trabajado unos cuantos detalles. A Feynman eso no le preocupó, solo era cuestión de seguir el camino de baldosas amarillas pintado por Dirac. Lo que le inquietaba era algo que había escrito el físico inglés: lo que acababa de hacer era «una analogía cuántica muy simple». ¿Cómo podía decir eso tras haber anunciado que podía producir resultados?

«¿Qué tipo de palabra es esa, en un artículo de física? —estalló Feynman—. Si dos expresiones son análogas, ¿no quiere decir que son iguales?». «No —contestó Jehle—. Lo más seguro es que Dirac no ha querido decir que sean iguales.» Feynman se acercó a

la pizarra y empezó a hacer cálculos; Dirac tenía razón, no eran iguales. «A lo mejor añadiendo una constante multiplicativa...», pensó.

Empezó a calcular a una velocidad que Jehle no podía seguir; sustituía términos, saltaba de una ecuación a otra... hasta que al final en la pizarra apareció algo tremendamente familiar: la ecuación de Schrödinger. ¡Sí había una unión con el formalismo lagrangiano! Jehle se puso a copiar como un poseso las ecuaciones de la pizarra en un cuaderno. El «análogo» de Dirac significaba simplemente «proporcional». Feynman había descubierto algo importante. Solo una pregunta quedaba en su mente: ¿Cómo es posible que el gran Dirac no se hubiera dado cuenta? Cuando en 1946 se encontró con él en la celebración del bicentenario de Princeton, intercambiaron las siguientes palabras:

— ¿Sabía que eran proporcionales? —preguntó Feynman.

— ¿Lo eran? —dijo Dirac.

— Sí.

— ¡Oh! Qué interesante.

Para lo exageradamente callado que era Dirac, fue una conversación muy larga.

Aplicando el lagrangiano, Feynman había reproducido los resultados que se obtenían resolviendo la ecuación de Schrödinger. A partir de ahí todo era cuesta abajo. Para calcular la amplitud de probabilidad de una serie de trayectorias solo había que hacer lo siguiente: asignar un «peso» (que puede ser positivo o negativo) a cada camino que es proporcional a la acción total de ese camino, que a su vez es múltiplo de la ubicua constante de Planck; luego, sumar todos estos pesos asociados a las amplitudes de probabilidad de cada camino y elevar al cuadrado esta cantidad: de este modo obtendremos la probabilidad de movernos de A hasta C en un tiempo determinado. Feynman tenía entre sus manos un aparato matemático maravilloso para explorar situaciones que, por su complejidad, la mecánica cuántica no podía hacer; entre otras, su propia teoría de los potenciales retardados.

Mientras escribía su tesis doctoral la enfermedad de Arline iba a peor. Había infectado el sistema linfático y a los médicos les

resultaba complicado diagnosticarla. El año 1941 estuvo repleto de continuas visitas a los médicos para tratar esa «fiebre glandular», el nombre con el que su familia había decidido camuflar el dictamen final de los médicos: la enfermedad de Hodgkin, un tipo de linfoma maligno y mortal. Feynman no estaba de acuerdo con esta decisión familiar; había pactado con Arline que nunca habría mentiras entre ellos, ni siquiera piadosas. ¿Cómo podían pedirle que mintiera en lo más importante de todo?

Los padres de Arline, los médicos, su propia hermana... todos insistían en que era muy cruel decirle a una joven en la flor de la vida que se iba a morir. Al final se vino abajo y transigió. Escribió lo que él llamó una «carta del adiós» y la llevó consigo en todo momento para entregársela cuando ella descubriera la verdad; estaba convencido de que jamás le perdonaría haberle mentido así.

No tuvo que esperar mucho tiempo, pues nada más regresar del hospital Arline escuchó la voz de su madre, entre incontenibles sollozos, contarle a una vecina el destino que le esperaba a su hija. Cuando Richard fue a visitarla Arline le puso entre la espada y la pared: no tuvo más remedio que contarle la verdad, le entregó la carta y le propuso matrimonio.

Pero los problemas nunca vienen solos. Las universidades como Princeton no dejaban que sus estudiantes tomaran por su cuenta semejantes decisiones. Cuando Feynman fue a hablar con el decano para decirle que su novia se moría y que se iba a casar con ella, él le contestó que si lo hacía se quedaría sin los doscientos dólares al año que ganaba como profesor ayudante. Ante semejante ultimátum, Feynman empezó a considerar la posibilidad de dejar la investigación y buscar un empleo. Andaba en esas disquisiciones cuando le informaron desde el hospital que habían encontrado el bacilo de Koch en las glándulas linfáticas. Arline no tenía la enfermedad de Hodgkin, sino un tipo muy raro de tuberculosis. No lo habían considerado antes porque ella no era la típica víctima de la «plaga blanca»: ni era lo bastante pobre ni lo bastante joven. Aunque la tuberculosis no tenía tratamientos efectivos, al menos su desenlace no era ni fulminante ni mucho menos seguro: ya no hacía falta que se casaran inmediatamente. Cuando se lo contó, Richard notó cierto tono de desencanto en la voz de su novia.

EN EL AMOR Y EN LA GUERRA

Durante la primavera de 1941 el ruido de sables, o más bien el repiqueteo de la ametralladora MG 34 alemana, se escuchaba por todo el mundo. Científicos refugiados de la Europa nazi se instalaban en las universidades norteamericanas. Los últimos en llegar,

LA GUERRA SE EXTIENDE

Desde la carta de Einstein al presidente Franklin Delano Roosevelt, la idea de construir una bomba atómica flotaba en Washington, pero poco se había hecho. La situación internacional obligaba ahora a tomarse en serio la amenaza que representaban las potencias del Eje. El 28 de junio de 1941, Roosevelt firmó la Orden Ejecutiva 8807 por la que creaba la *Office of Scientific Research and Development* (OSRD), destinada a coordinar toda investigación científica orientada al campo militar. Solo seis días antes los alemanes habían lanzado su Operación Barbarroja, invadiendo la Unión Soviética. Japón continuaba su presión política sobre los países occidentales y desde abril su alto mando llevaba planeando hacerse con los recursos naturales del sur de Asia, controlados por Inglaterra y Holanda. La guerra se deslizaba cuesta abajo hacia un desastre total. Finalmente, el 7 de diciembre, Japón atacaba las bases norteamericanas de Pearl Harbor, Guam y la isla de Wake, además de Hong Kong y el Estado Libre Asociado Filipino (ese era el nombre de Filipinas de 1935 a 1946, cuando el país formaba una mancomunidad con Estados Unidos), e invadía Tailandia y Malasia. Cuando Estados Unidos entró en guerra, la cuarta parte de los más de siete mil físicos que poblaban el país se unieron al esfuerzo bélico a través de la OSRD. Feynman se encontraba escribiendo su tesis doctoral.



El presidente de Estados Unidos, Franklin Delano Roosevelt, en la firma de la declaración de guerra contra Alemania, el 11 de diciembre de 1941.

como Herbert Jehle, contaban historias espantosas de persecuciones y campos de concentración. El impulso a la maquinaria bélica desde los centros de investigación empezaba a revelarse crucial; gran parte de la debacle nazi en la Batalla de Inglaterra se debió a un nuevo sistema para detectar aviones usando radiación de microondas, el radar, y prácticamente nadie sabía que el matemático Alan Turing (1912-1954) estaba poniendo las bases para la construcción del primer ordenador de la historia, Colossus, en Bletchley Park, una mansión a 80 km al noroeste de Londres. Su objetivo era romper los códigos de la Enigma, la máquina de encriptar mensajes que usaban el ejército y la marina alemanes.

Una mañana de 1942 entró en su despacho Robert R. Wilson. Este físico experimental había llegado a Princeton para descubrir una manera de separar el necesario uranio-235 (apuntado como tal casi tres años antes por Bohr y Wheeler) del inservible uranio-238. Solo había hablado con Feynman en unas cuantas ocasiones, pero ya había tomado nota mentalmente de que era «un tío grande». Y allí estaba, a punto de revelarle información de alto secreto sobre lo que estaba haciendo porque quería ficharlo para resolver los cálculos teóricos, y sabía que si no le contaba el problema en detalle no lo convencería.

Feynman quería terminar su tesis y graduarse, pues esa era una de las condiciones que se había impuesto para casarse. La propuesta de Wilson le sonaba más a problemas de ingeniería que de física y su primer pensamiento fue declinar la oferta. Pero por otro lado estaba la guerra: él había intentado alistarse en el ejército para ingresar en el Cuerpo de Señales, que se ocupaba de «proporcionar y gestionar los sistemas de comunicación e información necesario para el mando y control de las fuerzas armadas». Pero como le dijeron que no era seguro que acabara allí, desistió. Ahora le ofrecían una forma de colaborar en algo mucho más grande y significativo, así que dejó a un lado su tesis doctoral y fue a ver a Wilson para aceptar el trabajo.

Mientras tanto, Wheeler se había marchado a Chicago para trabajar junto a Enrico Fermi en la construcción de un reactor nuclear que controlara las reacciones en cadena que se producen en la fisión: era el primer paso para comprender lo que sucedía en

las reacciones incontroladas que se producían al estallar la bomba. Wigner también se encontraba cada vez más tiempo en Chicago, y en la primavera de 1942 ambos acordaron que aquel brillante estudiante tenía que acabar su tesis antes de seguir enfangándose con los métodos de separación del uranio. La presión de sus antiguos profesores tuvo éxito.

> «Quiero casarme con Arline porque la amo, lo que significa que quiero cuidar de ella. Eso es todo lo que hay. Quiero cuidar de ella. [...] No obstante, tengo otros deseos y objetivos en el mundo. Uno de ellos es contribuir a la física tanto como pueda. Para mí, esto es aún más importante que mi amor por Arline.»
>
> — Palabras de Feynman a propósito de su boda con Arline Greenbaum.

Feynman tenía muy claro lo que había logrado: reinventar la mecánica cuántica a partir del principio de mínima acción. Pero también era consciente de lo que no había conseguido, y dedicó el capítulo final a ello. Primero, su tesis no tenía ninguna referencia a comprobación experimental alguna porque su formulación era completamente no-relativista. Desarrollar la electrodinámica cuántica desde la formulación lagrangiana exigía un trabajo que no había hecho. Segundo, estaba su preocupación por la interpretación física de esta nueva formulación. Feynman conocía perfectamente que una de las fuentes de debate más intenso que se había producido en las décadas anteriores era el llamado «problema de la medida». El punto de vista comúnmente aceptado era la interpretación de Copenhague. Bohr había convencido a la mayoría de los físicos —salvo a Einstein— de que vivimos en un mundo donde las propiedades de los objetos no existen hasta que se miden, luego resulta imposible separar el objeto observado del observador.

Feynman había discutido largo y tendido del tema con el matemático húngaro-estadounidense John von Neumann. La cuestión era que hacer una medición implicaba dos cosas: un instrumento de laboratorio y un electrón; o, lo que era lo mismo, un sistema macroscópico, grande, regido por las leyes de la física

clásica, y un objeto microscópico, pequeño, controlado por la mecánica cuántica. ¿Dónde estaba la frontera entre uno y otro? Von Neumann decía que alguien debía decidir dónde ponerla. Esto a Feynman le parecía inaceptablemente arbitrario. Si la mecánica cuántica era una descripción completa de la realidad, esa separación debía surgir de ella de manera natural y de ningún modo podía depender de que alguien llegara y colocara la barrera donde le viniera en gana.

El aparato matemático desarrollado por Feynman, que en 1948 bautizaría como «integral de caminos», permitía separar el sistema en diferentes trozos, que es lo que uno esperaría hacer cuando mide algo: aislar aquellas partes del sistema que se quieren medir de las que no interesan. Este hecho, imposible de realizar con las formulaciones habituales de la mecánica cuántica, tiene toda la apariencia de una argucia matemática, pero no nos llevemos a engaño: es el que ha permitido los grandes avances que se han producido en la física teórica durante el siglo XX.

Feynman sabía que el tiempo era el problema en su formulación, pues requería «hablar de estados del sistema a veces muy lejos del presente». Esto convertía en un trabajo de titanes encontrar una interpretación física. No conseguirlo le sacaba de quicio; para él, no poder visualizar un formalismo era un anatema. Sea como fuere, en junio presentó su tesis: «El principio de mínima acción en mecánica cuántica». Y tal y como tenía previsto, a los pocos días anunció a su familia que se casaría con Arline al año siguiente.

Eso preocupó profundamente a Lucille, su madre. Pensaba que, a causa de su enfermedad, ella se convertiría en un ancla (y no en una vela) para su hijo a la hora de encontrar un trabajo. Temía también por su salud, sabía que los tratamientos para la tuberculosis eran caros y la enfermedad exigía gran dedicación, y dudaba que Richard pudiera disponer de dinero y tiempo para ella. El interés de su hijo por casarse lo veía como el deseo de agradar a alguien a quien amaba, «igual que acostumbrabas en ocasiones a comer espinacas para complacerme»; por eso le recomendaba que siguieran comprometidos. Ante esto, Feynman respondió a su madre que su determinación por compartir su vida con su gran amor era inamovible, pero sabía dónde se encontraba

dentro de su escala de valores. Y Arline, como chica inteligente que era, lo sabía y le apoyaba.

La boda se celebró en el ayuntamiento de Staten Island, sin que asistieran ni la familia ni los amigos. Los testigos de boda fueron dos extraños que se encontraban allí. Temeroso de contagiarse, no la besó en la boca. Tras la ceremonia llevó a Arline a su nueva casa, un hospital de beneficencia en Nueva Jersey. Él, por su parte, debía prepararse para marchar a Nuevo México, a un lugar llamado Los Álamos, con el objetivo de participar en uno de los proyectos científicos más importantes del siglo XX: la construcción de una bomba atómica.

UN NUEVO SOL EN EL CIELO

A las 5:30 de la mañana del 16 de julio de 1945, en una esquina del campo de tiro de la Fuerza Aérea en Alamogordo, en la cuenca del desierto de Nuevo México llamada Jornada del Muerto, Julius Robert Oppenheimer acaba de dar la orden de hacer detonar la primera bomba atómica de la historia. Feynman había llegado a Los Álamos con la primera oleada de científicos, a finales de marzo de 1943 y fue asignado a la división teórica que dirigía Hans Bethe, el pope indiscutible de la física nuclear.

La decisión de mudarse al lejano y árido oeste era la oportunidad de aventura y romance que la pareja siempre quiso tener. Arline escogió quedarse en un sanatorio en Albuquerque, a 160 km de Los Álamos. Richard iba a verla todas las semanas. Los dos años que pasó en aquel lugar dejaron una profunda huella en él. Y la vida le dio allí una oportunidad que, inconscientemente, no desaprovechó:

> Se dio la circunstancia de que, menos Hans Bethe, todos los peces gordos se encontraban fuera, y de que a Bethe le hiciera falta alguien con quien hablar. Total, que un día Bethe se viene a ver a un chavalillo presuntuoso e impertinente al que han puesto un despachito, y empieza a razonar, explicando su idea. «Ni hablar —le digo—. Está loco. Lo que pasará será esto, esto y esto.» Y él me dice: «Un momen-

EL HOMBRE QUE SUPO POR QUÉ BRILLAN LAS ESTRELLAS

En abril de 1938, dos de los gigantes de la física moderna, el ucraniano Georgi Gamow (1904-1968) y el norteamericano Edward Teller (1908-2003), organizaban un congreso en la Carnegie Institution de Washington. Su objetivo: resolver el problema de por qué brillan las estrellas. Entre los participantes se encontraba un refugiado de la Alemania nazi, experto en procesos nucleares y que daba clases en la Universidad de Cornell. Su nombre era Hans Bethe (1906-2005). Pensador efervescente, tenía un talento innato para la física y las matemáticas: parecía que se dedicaba a jugar con números y letras. En la reunión de Washington, los astrónomos dijeron a los físicos todo lo que sabían de la constitución interna de las estrellas, que era mucho, y eso sin conocer realmente cómo se generaba la energía en su interior. Uno de los textos clásicos de la astrofísica, *On the Constitution of the Stars,* escrito por el brillante Arthur Eddington, describía perfectamente la estructura interna de las estrellas sin necesidad de mencionar nada sobre la naturaleza de su motor energético. Ahora le tocaba a los físicos ponerse a trabajar.



En 1938, el físico alemán Hans Bethe encontró el mecanismo de las reacciones nucleares que explica cómo las estrellas producen su energía.

La determinación de Bethe

De vuelta en Cornell, Bethe atacó y resolvió el problema con tanta rapidez que Gamow llegaría a decir que había calculado la respuesta antes de que el tren llegase a la estación de destino. Bethe envió el artículo describiendo su hallazgo a la revista *Physical Review*, pero entonces uno de sus estudiantes le comentó que la Academia de Ciencias de Nueva York ofrecía un premio de 500 dólares al mejor artículo inédito sobre la producción de energía en las estrellas. Bethe pidió a la revista que le devolviese el artículo, lo mandó al concurso y, evidentemente, ganó. El físico tenía sus motivos para hacerlo. Su madre se encontraba todavía en Alemania y aunque los nazis accedían a dejarla salir, pedían 250 dólares si, además, quería llevarse sus muebles. Bethe destinó la mitad del premio para ello. Solamente después permitió que se publicara su artículo, con el que ganó el premio Nobel en 1967.

to nada más», y me explica por qué lo suyo no es una barbaridad, sino que la barbaridad es lo mío. Y así un buen rato.

Igual que le sucediera durante su primer seminario, cuando su cabeza se puso a pensar en física olvidó con quién estaba hablando:

> Resultó que eso era exactamente lo que a Bethe le hacía falta, y por eso acabé como jefe de grupo, bajo la dirección de Bethe, con cuatro personas a mis órdenes.

Hans Bethe fue lo mejor que le pudo haber pasado a Feynman. Wheeler le había dado alas a su entusiasmo y creatividad, pero necesitaba la parsimonia y meticulosidad que Bethe poseía. Sus formas de hacer física eran un reflejo de sus distintos caracteres. Bethe empezaba los cálculos por el principio y los terminaba por el final, paso a paso y costara lo que costase; Feynman podía empezar por la mitad, o incluso por el final, para ir de un lado para otro, saltándose pasos intermedios... Así que en el edificio de la División Teórica de Los Álamos de vez en cuando se escuchaba a Feynman gritar desde el fondo del pasillo: «No, no, no. ¡Está loco!». Sus compañeros levantaban la cabeza, sonreían y alguien decía: «Ya están de nuevo. ¡El *Acorazado* contra el *motobote Mosquito*!». Bethe se ganó el sobrenombre del *Acorazado* por la forma que tenía de resolver problemas dirigiéndose a toda máquina y en línea recta a la solución. Feynman, por su parte, fue apodado el *motobote Mosquito* en alusión a las torpederas PT, unas frágiles embarcaciones utilizadas por la marina de Estados Unidos cuya finalidad era atacar a buques de mayor tamaño.

Feynman necesitaba a una persona de la valía científica de Bethe para empezar a brillar. La mayor lección que aprendió del gran hombre fue su insistencia en que todo cálculo teórico tenía que ir acompañado de un número, una cantidad que pudiera compararse con resultados experimentales. Este principio guió a Feynman el resto de su carrera.

Dos años trabajando frenéticamente dan para mucho. En una carta del 2 de marzo de 1945 Richard comentaba a Arline que se había acostado a las cinco de la mañana y a las nueve y media

estaba despierto y totalmente despejado. Muchos y muy distintos fueron los logros de Feynman: primero ideó un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales de tercer orden; después, junto con Bethe, desarrolló una fórmula para estimar la eficiencia de un arma nuclear; después trabajó en el problema de la difusión de los neutrones rápidos que desencadenaban la fisión del uranio-235; y en los últimos meses antes de la prueba le pusieron a cargo de los aspectos computacionales dirigidos a un ensamblaje correcto de una bomba de plutonio: la prueba Trinity fue un éxito en gran medida gracias a que Feynman lideró el equipo que hizo los cálculos definitivos con las máquinas calculadoras electromecánicas proporcionadas por IBM.

«Si alguien le enseñaba una paradoja física, un truco de cartas o lo que fuera, no dormía hasta que encontraba la solución.»

— Comentario de Ted Welton, un amigo de Feynman que también trabajó en Los Álamos.

Todo el mundo en Los Álamos estaba impresionado con las habilidades de este joven físico. Parte de su éxito radicaba en su particular obsesión por encontrar solución a todos los problemas que le planteaban.

Mientras, a 160 kilómetros de allí, Arline empeoraba. El 6 de junio de 1945 Richard le escribió disculpándose por haberla reprendido duramente por algo que ella había hecho. La carta destila en cada línea un doloroso sentimiento de culpa:

> Esposa mía:
> Siempre soy demasiado lento. Siempre hago que te sientas desgraciada porque tardo en entender. Ahora lo entiendo. Te haré feliz ahora... Por fin entiendo lo enferma que estás... Este tiempo pasará, te pondrás mejor. Tú no lo crees pero yo estoy seguro... Lamento haberte fallado, no haberte proporcionado el pilar que tú necesitabas para apoyarte. Ahora soy un hombre en el que puedes descansar, tener confianza y fe... Utilízame como quieras. Soy tu marido.
> Adoro a una gran mujer y paciente. Perdóname por mi lentitud en comprender. Soy tu marido. Te quiero.





FOTO SUPERIOR:
Coloquio en Los Álamos en el marco del Proyecto Manhattan. Primera fila: segundo por la derecha, Enrico Fermi. Segunda fila: tercero por la derecha, Robert Oppenheimer, y a su izquierda, Richard Feynman.

FOTO INFERIOR:
Julius Robert Oppenheimer (con la pierna izquierda sobre los escombros) y el general Leslie Groves (a su derecha) en la zona cero tras la prueba Trinity.

Fue la última carta que Arline leyó de su marido. Murió el 16 de junio a las nueve y veinte de la noche. Al día siguiente, Feynman arregló los papeles para una cremación de urgencia y regresó a Los Álamos bien entrada la noche. Había una fiesta en el dormitorio y él se sentó en una silla, exhausto. Al día siguiente sus compañeros le preguntaron qué había pasado, a lo que Feynman respondió: «Ha muerto. ¿Qué tal va el programa?». No quería ni pésames ni lamentaciones. Entre sus papeles encontró el pequeño cuaderno donde iba anotando la evolución de la enfermedad de su mujer. Con mucho cuidado escribió: «16 de junio — Muerte». Quería volver al trabajo, pero Bethe le envió de vacaciones forzadas con su familia a Far Rockaway. Ellos no tenían ni idea de qué iba hasta que alguien con un fuerte acento extranjero preguntó por él. Su hermana Joan le contestó que hacía años que no iba por casa, a lo que la voz dijo: «Cuando llegue, dígale que Johnny von Neumann le ha llamado».

Richard se quedó varias semanas con sus padres, hasta que llegó un telegrama cifrado urgiéndole que se reincorporara. Voló desde Nueva York a Albuquerque, donde llegó al mediodía del 15 de julio. Un coche del ejército le llevó a la casa de Bethe, donde su mujer Rose le había preparado unos emparedados. Tenía el tiempo justo para coger el autobús que le iba a llevar al punto de observación en Jornada del Muerto, hoy conocido por el nombre que se le dio entonces, zona cero.

CAPÍTULO 3

La electrodinámica cuántica: QED

Después de la Segunda Guerra Mundial la física teórica pasaba por una de sus mayores crisis. La teoría que describía la interacción entre fotones y electrones, la electrodinámica cuántica (QED, acrónimo de *Quantum Electrodynamics*), producía infinitos en sus cálculos y nadie sabía qué hacer con ellos. Feynman estaba poniendo a punto su solución al problema, por la que ganaría el premio Nobel.

Richard Feynman dejó Los Álamos en octubre de 1945. Su trabajo allí lo había convertido en una de las estrellas rutilantes de la física norteamericana. Dos años antes Oppenheimer había escrito al jefe del departamento de Física de la Universidad de Berkeley pidiéndole que le ofreciera un puesto, pues era «sin lugar a dudas el físico más brillante que tenemos aquí». La oferta se hizo de rogar, y le llegó a Feynman en el verano de 1945. «Nadie ha rechazado nunca una oferta nuestra», le dijo pretencioso. Richard la rechazó.

Feynman estaba enamorado de las formas y maneras de Bethe y no tenía duda alguna de que quería ir a Cornell con él y el excelente grupo de investigación que estaba formando. Oppenheimer sabía que le iban a llover las ofertas y, como siempre en estos temas, no se equivocaba. En menos de un año recibió numerosas propuestas, pero las declinó todas: quería estar en el grupo de Bethe. Además, en su interior algo estaba sucediendo: empezaba a sentir la muerte de Arline. La primera vez que fue consciente sucedió paseando por Knoxville, Tennessee. Había ido allí para trabajar en el laboratorio de Oak Ridge, donde se encargaban de separar y producir uranio y plutonio:

> Pasaba yo junto a los escaparates de unos grandes almacenes, que mostraban lindos vestidos, y pensé cuánto le hubiera gustado a Arline alguno de ellos. Y eso fue demasiado para mí.

JULIAN SCHWINGER



Nacido en el Harlem judío de Nueva York en el seno de una familia ortodoxa, Schwinger (1918-1994) había demostrado precozmente su gusto por la ciencia pero, al contrario que Feynman, sabía dónde encontrar libros de matemáticas y física avanzadas: en las librerías de lance entre la Cuarta y la Quinta avenidas. Entró en el City College de Nueva York con catorce años y allí su mentor fue el físico descubridor de la resonancia magnética nuclear, Isidor Isaac Rabi, que nunca dejaba pasar la oportunidad de contar a quien quisiera escucharle cómo lo conoció: en su despacho encontró sentado a un joven de diecisiete años que, de repente, saltó para explicarle una idea que había tenido sobre la última paradoja lanzada contra la mecánica cuántica por Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen. Schwinger raramente acudía a clase y empleaba todo su tiempo, esencialmente nocturno, en estudiar la mecánica cuántica; no es de extrañar que la junta de la universidad estuviera considerando tomar algún tipo de medida contra él. Rabi le ayudó a trasladar su expediente a la vecina

Feynman se echó a llorar por primera vez. Su relación con su madre se había resentido por la oposición de esta a su boda. En su viaje a Ithaca, donde se encuentra la Universidad de Cornell, no pasó por casa. Lucille empezó a darse cuenta del daño que le había hecho. Una noche, incapaz de dormir, se levantó y escribió una carta angustiosa y llena de cariño, la carta que escribiría una madre que ve cómo está perdiendo a su hijo:

> ¿Qué ha pasado entre tú y tu familia? ¿Qué te ha alejado? Mi corazón te añora [...] La culpa debe ser mía. En algún lugar del camino te he perdido. [...] Te necesito. Te quiero. Nunca te daré por perdido. Ni la muerte puede romper lo que nos une [...] Cariño, oh cariño, qué más puedo decirte. Te adoro y siempre lo haré.

Universidad de Columbia y, una vez allí, una de las principales aficiones de Rabi era disfrutar llamando por teléfono a los profesores de Schwinger para animarlos a que superaran el miedo que tenían a suspenderle: «¿Qué eres, un hombre o un ratón? Ponle una F [la peor nota en las universidades anglosajonas]», le dijo una vez a un triste profesor de Química. Sabía que esa nota le iba a atormentar más a él que a Schwinger.

Un adelantado

En 1936, con dieciocho años, Schwinger ya conocía perfectamente la nueva física que Feynman aún tenía que descubrir. Con su serio semblante, este chico intensamente tímido se instalaba en la biblioteca y dedicaba horas y horas a leer y desmenuzar los artículos de Paul Dirac en los *Proceedings of the Royal Society of London*. Ese año escribió su primer trabajo de física: lo tituló «On the interaction of several electrons». Antes de graduarse ya tenía lista su tesis doctoral y había colaborado con lo mejor de la física del momento: Fermi, Teller, Bethe. Entre tanto, Feynman se encontraba en su primer año en el MIT. Para cuando este entregó su tesis, Schwinger estaba en Berkeley trabajando directamente con Oppenheimer. Durante la guerra decidió que prefería el Laboratorio de Radiación del MIT a Los Álamos y ocuparse de mejorar el radar, el invento que los ingleses habían cedido a los norteamericanos. Dictaba sus charlas y seminarios en un tono monocorde —le encantaba hablar así— y le gustaba hacerlo de manera que obligara a sus oyentes a pensar. Algo complicado, ya que lo habitual era no poder seguir sus explicaciones.

Feynman fue a casa las navidades de 1945; la herida empezaba a cerrarse. Entre tanto había vuelto a trabajar en la teoría que había dejado incompleta al abandonar Princeton. Había intentado un par de cosas, pero no funcionaban. Lo peor de todo era que estaba intelectualmente fuera de juego y le costaba mucho concentrarse. Su ánimo estaba cayendo en un pozo negro, muy negro, del cual no sabía, o no quería, salir. En la primavera tuvo la oscura sensación de haber perdido el tren profesional. En Los Álamos se había enfrentado a desafíos matemáticos y computacionales impresionantes, pero la física subyacente estaba bien asentada y para nada era ciencia de frontera. Ahora que había vuelto a lidiar con el tipo de problemas a los que se había estado enfrentando durante la tesis, intelectualmente desafiantes y que involucraban cuestiones de

principio, pensaba que no iba a dar la talla. Creía que no podía competir con aquellos que no habían abandonado su investigación, como había hecho él al incorporarse en Los Álamos, y le llevaban casi tres años de ventaja. Entre esos competidores se encontraba un físico estadounidense de su misma edad, silencioso y al que le gustaba la ropa cara y conducir un Cadillac, Julian Schwinger. Cuando Feynman llegó a Cornell ambos tenían veintinueve años, y mientras él tenía que explicar una asignatura de lo más mundana, métodos matemáticos de la física, Schwinger era todo un profesor de Harvard —el profesor más joven que jamás haya tenido esa universidad— y sus clases sobre física nuclear eran la atracción de la comunidad de físicos del lugar y del vecino MIT.

CAÍDA Y REGRESO

El 8 de octubre de 1946 la vida le asestó un nuevo golpe a Feynman. Casi un año y medio después de la muerte de su mujer, su padre Melville moría de un ataque al corazón. Una noche nueve días después, en el peor momento de su depresión, cogió papel y bolígrafo y escribió a la única persona que sabía que podía ayudarle, su esposa muerta:

> Te adoro, cariño.
> Sé cuánto te gusta oír esto, pero no solo lo escribo porque a ti te guste; lo escribo porque me reconforta escribírtelo. [...] Me resulta difícil entender lo que significa amarte después de que hayas muerto, pero aún quiero consolarte y cuidar de ti, quiero que tú me ames y cuides de mí. Quiero tener problemas que discutir contigo, quiero hacer pequeños proyectos contigo. [...] Cuando enfermaste te preocupaste porque no podías darme algo que tú querías hacer y pensabas que yo necesitaba. No tenías que haberte preocupado. Igual que te dije entonces, no era necesario porque te quería mucho y de muchas maneras. Y ahora incluso es más cierto: no puedes darme nada ahora pero yo te quiero y te interpones en mi camino para amar a cualquier otra, pero quiero permanecer así. Tú, muerta, eres mucho mejor que cualquier otra viva.

> Sé que me dirás que estoy loco y que quieres que sea plenamente feliz y no quieres interferir en mi camino. Apostaría a que estás sorprendida de que ni siquiera tenga una novia (excepto tú, tesoro) después de dos años. [...] No lo entiendo, pues he conocido a muchas chicas y muy guapas y no quiero quedarme solo, pero tras dos o tres encuentros todas ellas parecen cenizas. Solo tú me quedas. Tú eres real.
> Mi querida esposa, te adoro.
> Amo a mi mujer. Mi mujer está muerta.
> Rick
> P.D. Perdona que no eche esto al correo, pero no sé tu nueva dirección.

La carta, que se conserva muy gastada —lo que indica que seguramente la releyó muchas veces—, fue a un sobre, y el sobre a una caja. Nadie supo de ella hasta su muerte. Nunca formó parte de la colección de historias que acompañaron a Feynman durante toda su vida, como tampoco lo hizo su explosión de ira durante el entierro de su padre.

«Un Feynman deprimido es solo un poco más alegre que cualquier otra persona cuando derrocha entusiasmo.»

— **Hans Bethe en referencia a la apariencia de Feynman frente al recuerdo de la muerte de su esposa.**

Feynman se sentía solo. Pasaba el tiempo en la biblioteca leyendo *Las mil y una noches* y como aparentaba menos años de los que tenía, comía en la cafetería de estudiantes y acudía a sus fiestas y guateques. Claro que no es de extrañar que las chicas a las que sacaba a bailar le miraran con recelo cuando les decía que era un físico que acababa de regresar de construir la bomba atómica. Eso sí, no le iba nada mal en las suertes del ligue. Antes de marchar de Los Álamos se había convertido en todo un casanova: quedaba con muchas chicas, especialmente si eran bonitas.

Feynman, que se encontraba en el peor momento personal de su vida, pensaba que profesionalmente ya poco podía decir; había perdido el gusto por la física. Así que cuando recibió casi simultáneamente ofertas por parte de la Universidad de Princeton y del

Instituto de Estudios Avanzados pensó: «Están totalmente locos». No entendía por qué le querían contratar, ni tampoco por qué le había contratado Cornell. Wilson le dijo que no se preocupara, que era un riesgo que había corrido Cornell, no él. «Mientras los profesores den las clases debidamente, habrán cumplido su parte del acuerdo», añadió. Nadie del departamento era consciente de lo mal que lo estaba pasando.

No obstante, todo estaba a punto de cambiar. Un día, mientras comía en la cafetería de los estudiantes, tuvo una epifanía al ver volar una bandeja:

> Mientras la bandeja volaba dando vueltas, me fijé que había en ella un medallón de Cornell. La bandeja giraba y se bamboleaba, y saltaba a la vista que el medallón giraba más rápidamente de lo que se bamboleaba. No tenía nada que hacer, así que me puse a calcular cuál sería el movimiento de la bandeja giratoria.

Su intuición física le decía que los dos movimientos estaban relacionados y empezó a jugar con las ecuaciones. Utilizó el formalismo lagrangiano que tan bien conocía y obtuvo una relación entre el giro y el bamboleo de 2 a 1. Como también quería entender el problema *à la Newton*, identificando todas las fuerzas en juego y resolviendo la ecuación de movimiento, se puso a ello. Al terminar le enseñó sus resultados a Bethe, quien le espetó: «Todo esto está muy bien, Dick. ¿Pero qué importancia tiene?». A lo que contestó: «No tiene la más mínima importancia. Lo hago solo por divertirme».

Por fin había recuperado su pasión por la física. Las células grises de Feynman no habían perdido su tono:

> Seguí trabajando en las ecuaciones de los bamboleos. Después pensé en cómo empezarían a moverse las órbitas electrónicas en condiciones relativistas. Y después en la ecuación de Dirac. Después, en la electrodinámica cuántica. Y antes de que me diera cuenta estaba «jugando» con el mismo problema de siempre, que tanto me apasionaba, el que había dejado abandonado al irme a Los Álamos.

Feynman había vuelto.

AL INFINITO Y MÁS ALLÁ

La teoría cuántica necesitaba nuevos datos experimentales y nuevas ideas teóricas que pudieran iluminar el camino en el que llevaba atascada dos décadas. Los primeros iban a empezar a obtenerse en los laboratorios que estaban construyendo ciclotrones, los primeros aceleradores de partículas en los que se las hacía chocar contra hojas de metal o gases y cuyos productos de colisión se fotografiaban en unos detectores llamados «cámaras de niebla», capaces de registrar el paso de las partículas. En 1936, Princeton había construido el suyo por el coste de unos cuantos coches.

Lo segundo (nuevas ideas teóricas) era harina de otro costal, pues las ideas no crecen en los árboles: hay que ponerse a pensar mucho y bien. Feynman necesitaba salir del atolladero en el que estaba metido desde Princeton y obtener una versión relativista de su nueva formulación cuántica. Para ello decidió reducir el universo a una sola dimensión espacial y otra temporal: el electrón únicamente podía moverse adelante y atrás por una línea recta, como un pato de un puesto de tiro al blanco de las ferias. Con tan drástica simplificación quería ver si podía derivar, usando el método que había inventado en Princeton, la ecuación unidimensional de Dirac. Lo consiguió, pero decidió no publicarlo: era solo un indicativo de que iba por buen camino.

Entre tanto, en la comunidad de físicos teóricos crecía un devastador sentimiento de impotencia. Llevaban más de dos décadas enfrentándose a un grave problema y no estaban más cerca de resolverlo que cuando se planteó por primera vez. ¿Qué era eso que les tenía tan inquietos? Desde que Dirac introdujera, por un lado, la ecuación relativista del electrón y, por otro, la segunda cuantización del campo electromagnético, los físicos habían calculado todo lo calculable. Y al hacerlo se encontraron con una curiosa paradoja: la aproximación más simple daba resultados en excelente acuerdo con los datos experimentales, pero tan pronto como llevaban esa aproximación un poco más allá refinando los cálculos, los términos adicionales se disparaban al infinito. Así estaban desde la década de 1930 y nadie entendía por qué ocurría ni sabía cómo resolverlo.

Dirac había cuantizado el campo electromagnético y poco después, en 1927, Pascual Jordan extendía ese trabajo a cualquier campo: se había convencido de que todo, desde los electrones y los protones a la fuerza electromagnética que los mantiene ligados en los átomos, surge en última instancia de campos cuánticos.

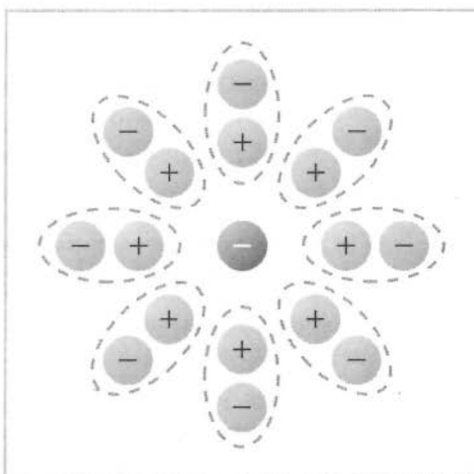
«La luz no es un material de propagación instantánea, tiene una velocidad, y es finita.»

— Richard Feynman. *El carácter de la ley física* (1965).

Ese mismo año Heisenberg, trabajando en las consecuencias de su mecánica matricial, introducía sus relaciones de incertidumbre en el artículo «Sobre el contenido claro de la teoría cuántica de la cinemática y la mecánica», en la revista *Zeitschrift für Physik*. ¿Qué es lo que aparece si unimos el trabajo de Dirac y Jordan al de Heisenberg? Que el campo electromagnético es, en realidad, un hervidero de fotones que aparecen y desaparecen como pompas de jabón, pero imposibles de observar.

Las partículas virtuales ofrecían a los teóricos nuevas herramientas para describir las interacciones subatómicas, aunque nunca imaginaron que el precio a pagar fuera tan alto. Sabían que podían usarlas para añadir correcciones a sus cálculos y, de este modo, obtener valores más precisos de cantidades electrodinámicas como la autoenergía del electrón, calculada por primera vez por Heisenberg y Pauli en 1929-1930. Cuando se hace esto en física (técnica que se conoce como «teoría de perturbaciones»), normalmente cada nueva corrección es más pequeña que la anterior, pues lo que se está haciendo es afinar cada vez más el resultado. Lo mismo sucede cuando se quiere encontrar una emisora de radio: al principio la amplitud del desplazamiento por el dial es grande, pero se va reduciendo a medida que localizamos la frecuencia de emisión. Pero cuál no sería su sorpresa al descubrir que, en el caso de los cálculos electrodinámicos, la contribución de las correcciones a la autoenergía se disparaba al infinito. Durante la década de 1930 problemas similares habían aparecido con otras cantidades, como en la llamada *polarización del vacío* (véase la figura).

Este fenómeno nos dice que la carga observada del electrón no es su carga «real», desnuda. ¿Por qué? Recordemos que el electrón se mueve siempre rodeado de una nube de pares electrón-positrón virtuales. Debido al campo eléctrico del electrón estos pares los podemos imaginar organizándose de tal manera que los positrones virtuales se colocan más cerca de él y los electrones virtuales más lejos, luego nunca vamos a poder medir cuál es la verdadera carga del electrón —su carga desnuda— porque se encuentra parcialmente apantallada por una nube de positrones virtuales. La carga efectiva del electrón va a ser su carga desnuda más la corrección QED: $e_{\mathrm{eff}} = e_0 + \delta e$. Como en el caso de la masa, se esperaba que δe fuera mucho menor que e_0. Sucedía todo lo contrario.



La polarización del vacío: la carga del electrón que observamos es la carga «desnuda» apantallada por una nube de pares virtuales electrón-positrón.

¿Cuál es la razón de estas divergencias? El principio de incertidumbre de Heisenberg, que permite a las partículas virtuales aparecer con cantidades casi ilimitadas de energía. Recordemos que en ese bullicioso mar de pares electrón-positrón la única regla a seguir es que su tiempo de existencia depende de la energía con la que aparecen: cuanta más energía, menos tiempo. Por tanto, no hay ningún impedimento para que esos pares de partículas virtuales surjan con energías cada vez mayores si acaban devolviéndola en el instante de tiempo apropiado siguiendo el principio de incertidumbre. Además de estas cuestiones, un segundo problema más mundano aparecía por dondequiera en los cálculos de la QED: su formalismo era largo y pesado. Una simple cuenta podía llevar meses para realizarla, pues seguirle la pista a todas las diferentes maneras en que podían comportarse las partículas virtuales se acababa convirtiendo en una pesadilla algebraica.

Infinitos, cómputos prácticamente inabarcables... Los grandes de la física de mediados de la década de 1930 veían en todo

CALCULA Y RECALCULA

Dos electrones interaccionando pueden intercambiar, en principio, un solo fotón virtual; pero también dos, tres, siete mil, 3459494 fotones... Y cuantos más fotones se añadían, más complicadas eran sus ecuaciones y el cálculo mecanocuántico completo obligaba a hacerlo para cada escenario, sumando al final todas las contribuciones. Ahora bien, al aplicar la teoría de perturbaciones, los físicos ordenan los diferentes términos que deben sumarse en orden de mayor a menor de una cierta cantidad, en este caso proporcional a la carga del electrón al cuadrado, e^2. Así, cuando dos electrones se intercambian un fotón, su contribución va con e^2; si son dos, arrastran un término proporcional a e^4; si son tres, entonces va con e^6, un valor diez mil veces más pequeño que el de un solo electrón. En puridad, la suma se extiende hasta el infinito para incluir todas las contribuciones posibles, pero en la práctica los físicos truncaban esta serie después de calcular unos pocos términos.


El físico alemán Hans Euler en 1937.

La contribución de Euler

El enfoque puede parecer simple, pero resultaba muy complicado de implementar en la práctica. Un ejemplo puede darnos una idea de ello. Hans Euler (1909-1941) era un estudiante de doctorado alemán que trabajaba con Heisenberg en la Universidad de Leipzig. Durante el verano de 1934 se puso a calcular algo que inicialmente no era muy complicado, la dispersión de la luz por la luz (esto es, la luz interaccionando consigo misma, algo que al nivel más básico —ignorando las partículas virtuales— no puede suceder). Para ello utilizó el cálculo perturbativo. Tras dieciocho meses había llegado solamente hasta el término e^4, lo que significaba haber incluido en sus ecuaciones tan solo un único par electrón-positrón virtual. El titánico esfuerzo de Euler, por el que recibió su doctorado, ocupó 55 páginas en la revista *Annalen der Physik*.

ello signos para una nueva revolución conceptual. Pero tras la guerra, la nueva hornada de físicos que se habían encargado de los problemas tecnológicos que conllevaron la bomba atómica y

el radar estaban dispuestos a resolver del mismo modo los problemas de la electrodinámica cuántica. Su planteamiento era eminentemente práctico: menos reflexiones filosóficas sobre la epistemología de la nueva física y más enfrentarse al problema que realmente importaba: encontrar un modo de eliminar los infinitos de las cuentas. A este programa de trabajo se le puso el nombre de *renormalización*.

Y entonces, un sábado de abril de 1947, Willis Lamb, un científico del Laboratorio de Radiación de la Universidad de Columbia (una rara avis dentro de la física, pues era un teórico reconvertido a experimental) y su estudiante Robert Retherford descubrieron un hecho que iba a marcar el futuro de la física: al bombardear con microondas el átomo de hidrógeno para medir con una precisión jamás alcanzada sus niveles de energía, se encontraron con una pequeñísima diferencia entre dos de ellos, cuando la teoría de Dirac predecía que debían tener exactamente la misma energía. ¡Dirac estaba equivocado! Semejante descubrimiento hizo que Lamb no pudiera quitarse de su cabeza dos palabras: premio Nobel. Dos meses más tarde, Oppenheimer le invitaba a participar en un pequeño encuentro en el hotel Ram's Head situado en la isla Shelter, en el límite este de Long Island. Nadie imaginaba que se trataría de un encuentro que, al igual que sucedió con el quinto Congreso Solvay de 1927, iba a cambiar la física.

REUNIÓN EN LA ISLA SHELTER

La tarde del 1 de junio de 1947, aquellos neoyorquinos que acababan de salir del trabajo debieron de quedarse sorprendidos al ver una larga columna de motoristas de la policía con las sirenas encendidas escoltando un autobús hacia la isla Shelter. En su interior viajaban veinticuatro físicos, la mayoría de ellos artífices del Proyecto Manhattan. Ya en el hotel, «correteaban por los pasillos balbuceando ecuaciones matemáticas, y cenaban en medio de la exaltación de las discusiones técnicas», escribió un periodista del *New York Herald Tribune* al día siguiente. Un rumor se propagó

como la pólvora entre los residentes de la isla: estaban allí para crear un nuevo tipo de bomba.

En realidad, organizada por Oppenheimer y auspiciada por la Academia Nacional de Ciencias, el objetivo de la reunión era discutir el futuro de la física teórica. En aquellos momentos la moral estaba literalmente por los suelos. Isidor Isaac Rabi había comentado a un colega antes de acudir a la reunión que «los últimos dieciocho años han sido los más improductivos de este siglo», y otro de los padres de la QED, el austriaco Victor Weisskopf (o «Viki», como le llamaban cariñosamente), había dicho que «la física teórica se encuentra en un *impasse*». La sensación generalizada era que llevaban más de dos décadas dándose cabezazos contra la misma pared.

La reunión tenía por objeto una discusión informal de los problemas de la QED. Cuando Lamb presentó sus resultados la mañana del 2 de junio, todo el mundo supo que ahí estaba la clave que resolvería el problema. La discusión posterior sobre qué era lo que significaban la lideraron Oppenheimer y Weisskopf. Entonces se levantó Rabi y mostró los resultados de sus propios experimentos. Con la ayuda de dos de sus estudiantes, John Nafe y Edward Nelson, había encontrado que al poner el átomo dentro de un campo magnético aparecían pequeñísimas pero significativas diferencias con las predicciones teóricas de la ecuación de Dirac en un término conocido como *factor-g*. La teoría relativista de Dirac predecía que debía valer 2; el experimento de Rabi daba 2,00244. La diferencia era muy pequeña, del orden del 0,1%, y cualquier físico experimental diría que estaba en perfecto acuerdo con la predicción teórica. Pero a los reunidos en la isla Shelter esta minúscula discrepancia les parecía harto estimulante: los problemas de la QED no eran solo cosa de infinitos.

Las discusiones se prolongaron hasta la noche, incluso durante la cena rápidamente engullida. El grupo se dividía en otros más pequeños y se debatía en los pasillos, en la sala de estar... La emoción se respiraba en cada rincón. Al día siguiente un discípulo de Bohr, Hans Kramers, exponía su idea de cómo debía tratarse la masa de un electrón embebido en un campo electromagnético. Imaginemos que la autoenergía del electrón aparece como una





FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Feynman era amante de los instrumentos de percusión.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
El físico austriaco Victor Weisskopf, quien durante la Segunda Guerra Mundial participó con Feynman en el Proyecto Manhattan.

FOTO INFERIOR:
Premios Nobel de 1965. De izquierda a derecha: Robert Woodward (química), Julian Schwinger y Richard Feynman (física), François Jacob, André Lwoff y Jacques Monod (fisiología o medicina), y Mijaíl Sjolochov (literatura).



contribución adicional a la masa del electrón. Dicho de otro modo, su masa observada es la masa «desnuda» más la «masa electromagnética» que surge de la interacción con su propio campo. La «masa desnuda», dijo, es una cantidad puramente teórica, la que tendría en ausencia de un campo electromagnético. Pero la que realmente medimos es la otra, la «masa vestida». Esto implica que las ecuaciones deben reescribirse en función de la masa observada: la teoría debía «renormalizarse». Weisskopf y Schwinger sugirieron que el efecto descubierto por Lamb podía ser debido a las interacciones entre los electrones y las ubicuas partículas virtuales y que la propuesta de Kramers podría dar una solución definitiva.

«He asistido a muchos congresos desde entonces… pero en ninguno me he sentido tan importante como entonces.»

— Impresión de Feynman sobre la reunión en la isla Shelter.

En la mañana del tercer y último día de reunión Oppenheimer pidió a Feynman que ofreciera una descripción informal de su trabajo, y allí presentó sus ideas sobre la aplicación del principio de mínima acción a la mecánica cuántica no-relativista y su planteamiento de la suma a todas las trayectorias. Sin embargo, a pesar de tratarse de una imaginativa reinterpretación de la mecánica cuántica, no producía ningún resultado comprobable y tampoco había logrado desarrollar la ecuación de Dirac en esta formulación: solo parecía jugar con unas cuantas ideas. Como dijera tiempo después uno de los asistentes a la reunión, Abraham Pais, «nadie entendía de lo que estaba hablando». La reunión terminó con una sensación de que la QED era una completa debacle. Como recordaría Schwinger tiempo después, «los hechos eran increíbles; decían que la sagrada teoría de Dirac se desmoronaba completamente».

Tras la reunión, Bethe tomó el tren a Schenectady, donde trabajaba como consultor a tiempo parcial para la General Electric. Sentado en el vagón empezó a darle vueltas a la sugerencia de Kramers. ¿Y si restaba a la expresión derivada de la QED para un electrón libre la que se obtiene para un electrón atrapado en el átomo de hidrógeno? Las dos incluían el término divergente de la

autoenergía y era como restar infinito menos infinito; seguramente obtendría un resultado absurdo... o quizá no. La máquina de calcular que era Bethe se puso manos a la obra, pero lo planteó desde una QED no-relativista. Cuál no sería su sorpresa al descubrir que, a pesar de que el resultado obtenido seguía divergiendo a infinito, lo hacía mucho más despacio. La intuición de Bethe le decía que si hacía lo mismo desde una QED relativista, esa divergencia desaparecería por completo. Bethe telefoneó a Feynman contándole lo que había descubierto y para asegurarse de que un borrador de sus cuentas le llegara a Oppenheimer en menos de una semana. Cuando regresó en julio a Cornell, dio un seminario explicando sus cálculos y aventuró por dónde podían ir los tiros para poder implementar el límite relativista. Tras la charla, Feynman se acercó a él y le dijo: «Puedo hacerlo por ti. Te lo llevaré mañana al despacho».

RENORMALIZACIÓN

Por entonces, Feynman se estaba enfrentando a su mayor problema: poner por escrito sus ideas en forma de artículo científico, en particular, aquellas que había desarrollado en su tesis doctoral. Esto no era nada fácil para él. Sí era capaz de redactarlas como anotaciones personales usando su particular tono coloquial para futuras investigaciones. Pero escribir un artículo científico exigía un tipo de lenguaje más formal y una manera de explicar los resultados de forma lógica y coherente, paso a paso. Justo al revés de como trabajaba Feynman. Él no seguía ninguna secuencia lógica. Muchas veces intuía las respuestas y luego la aplicaba a numerosos ejemplos para comprobar si tenía razón. El físico Murray Gell-Mann (que colaboraría con Feynman en la década de 1950 cuando ambos estaban en el Caltech) contaba una anécdota que refleja muy bien su estilo de trabajo. Un día, un estudiante acudió a él con una serie de notas de una conferencia que creía pertenecían a Richard Feynman. Gell-Mann las miró y dijo: «No, no son suyas. Sus métodos no son los mismos que los nuestros». «¿Y cuáles son?», preguntó el estudiante. Gell-Mann se acercó a la pizarra que

había en su despacho y le explicó: «El método de Dick es el siguiente. Escribes el problema. Piensas muy intensamente —dijo mientras cómicamente cerraba los ojos y apretaba los nudillos contra la frente—. Y entonces escribes la solución».

Con semejante forma de trabajar era imposible que Feynman tuviera fuerzas para sentarse a redactar el artículo. Para ello tuvieron que intervenir sus amigos Bert y Mulaika Corben quienes, según confesaron, en el verano de 1947 «prácticamente encerramos a Dick en una habitación y le dijimos que empezara a escribir». Al final lo consiguió y apareció en la revista *Reviews of Modern Physics* al año siguiente: «Space-time approach to non-relativistic quantum mechanics». Esta revisión de su trabajo de tesis le sirvió para que, por primera vez y de forma explícita, describiera de manera completa la mecánica cuántica usando el nuevo lenguaje de «la suma de caminos». Ahora ya podía volver a intentar triunfar donde antes había fracasado: una teoría cuántica relativista del electromagnetismo.

Tras la charla de Bethe, Feynman se sintió con fuerzas, pero como nunca había trabajado en el tema se dirigió a su despacho para que le explicara cómo hacer los cálculos. En contrapartida, Dick le explicó su nuevo formalismo. Empezaron a hacer las cuentas para incluir la relatividad, pero cometieron un error: los infinitos de la autoenergía eran aún peores que los surgidos de las entrañas de la ecuación no-relativista resuelta por Bethe. Feynman regresó a su despacho convencido de que se habían equivocado y que el resultado debía ser finito. Y se puso a trabajar.

Muy a su estilo, empezó por aprender cómo manejarse con la teoría de los huecos y el mar de energía negativa de Dirac hasta que estuvo seguro de que podía utilizar su formulación de integrales de camino. Al final fue capaz de obtener valores finitos usando la sugerencia de Kramers y obtuvo un valor para el desplazamiento Lamb muy cercano al experimental. Por desgracia, Feynman no era el único que lo había logrado. Sus competidores también habían llegado a un resultado similar: Weisskopf y su estudiante Anthony French por un lado, y el niño mimado de Harvard, Julian Schwinger, por otro. Schwinger había conseguido eliminar los infinitos de la teoría mediante una serie de elegantes

manipulaciones matemáticas conocidas como «transformaciones canónicas». Había renormalizado la masa del electrón siguiendo la sugerencia de Kramers y también había hecho lo propio con su carga. El problema con la solución de Schwinger era que la suma de una serie de términos obtenidos por técnicas perturbativas —las mismas que se habían usado en la QED hasta entonces— exigía unos cálculos horrorosamente complicados a partir del tercer término (o, como se dice técnicamente, a partir de la corrección radiativa de segundo orden). Por fortuna, Schwinger había descubierto que la serie convergía rápidamente y los primeros tres términos bastaban para dar resultados en perfecto acuerdo con los datos experimentales proporcionados en la isla Shelter: su predicción para el factor-g era 2,00118 (recordemos que Rabi había obtenido 2,00244) y para el desplazamiento Lamb era de 1,051 megaciclos, cuando el dato experimental era 1,062.

«El futuro es impredecible, todo se basa en probabilidades.»

— Richard Feynman.

El 30 de marzo de 1948 la Academia Nacional de Ciencias auspiciaba un segundo encuentro en las montañas Pocono, en Pennsylvania. Al igual que sucediera en Ram's Head, la residencia Pocono Manor se convirtió en el punto de reunión de las grandes mentes de la física: Oppenheimer, Fermi, Bethe, Rabi, Teller, Wheeler y Von Neumann repetían y a ellos se unían dos gigantes de la física de la preguerra, Bohr y Dirac. Todo el mundo esperaba que Schwinger diera la respuesta definitiva a la QED relativista. Eso sucedió la mañana siguiente.

Julian empezó su disertación sin la más leve entonación: «Voy a considerar un campo electromagnético cuantizado en el que cada pequeño volumen de espacio podemos manejarlo como una partícula». Introdujo una complicada notación y comenzó una lección magistral de virtuosismo matemático que muy pocos podían seguir. Pero la audiencia no era a la que él estaba acostumbrado, y la locomotora tuvo que lidiar con continuas interrupciones. Incluso Bohr se atrevió a hacerlo. Schwinger, que odiaba que le detuvieran en su

camino a la estación de destino, le cortó con sequedad. Una ecuación llevaba a la otra y Julian lo hacía sin seguir un solo apunte, en una maratón matemática que duró hasta primera hora de la tarde. Bethe se dio cuenta que las únicas objeciones aparecían cuando Schwinger explicaba la física subyacente; en la parte matemática todos permanecían mudos. Fermi, con una pizca de orgullo, se dio cuenta de que sus colegas habían dejado de prestarle atención: únicamente él y Bethe eran capaces de seguir sus razonamientos matemáticos. Fue al terminar cuando dicen que su protector, Oppenheimer, se levantó y dijo: «Cuando cualquiera da una conferencia es para decirnos cómo se debe hacer algo; cuando la ofrece Julian es para decirnos que eso solamente lo puede hacer él».

Ahora le tocaba el turno a Feynman. Bethe le advirtió que tras la exposición de Schwinger lo mejor que podía hacer era pegarse como una lapa a la matemática del asunto y olvidarse de la física, «porque cada vez que Schwinger ha intentado hablar de física se ha metido en problemas». Feynman le hizo caso, a pesar de que no había justificado matemáticamente el método que había empleado. Las ecuaciones las había obtenido «a la Feynman», por ensayo y error, junto con un buen chorro de intuición física. Sabía que eran correctas porque las había comprobado en infinidad de ejemplos y situaciones, incluyendo todas las de Schwinger. Pero ni podía demostrar rigurosamente que funcionaban ni podía conectarlas a la antigua teoría cuántica.

La diferencia de personalidad de Schwinger y Feynman se reflejaba en su forma de hacer física. Donde Schwinger era lógico y convencional, siguiendo un camino largo y pesado, Feynman era intuitivo y se desplazaba por las matemáticas con su mochila llena de conjeturas, normalmente muy inspiradas, y no se achantaba si tenía que considerar caminos estrafalarios.

Schwinger escuchaba por primera vez la teoría de Feynman y le pareció repulsiva, aunque no lo dijo. Le sonaba a pura ingeniería, un *collage* de ecuaciones sin ton ni son producto de la intuición, no de una matemática bien fundamentada. Las objeciones de los asistentes surgían una tras otra y poco a poco Feynman descubrió que todo el mundo debía tener un principio o teorema favorito y sus ideas violaban todos y cada uno de ellos: «¿De dónde viene esa fór-

mula?», le preguntaban. Él no podía justificarla, solo insistía diciendo: «Es la fórmula correcta». «¿Y cómo lo sabe?», seguían. «Porque da el resultado correcto» «¿Y cómo sabe que lo da?» «Es lo que trato de mostrar con un ejemplo tras otro», concluía Feynman.

«Esta es una nueva fórmula matemática con la que ahora mostraré que se obtienen todos los resultados de la mecánica cuántica.»

— Declaración de Feynman frente a la respuesta a la **QED** expuesta por Schwinger en el encuentro de físicos en la residencia Pocono Manor, en Pennsylvania, el **30** de marzo de **1948.**

No había manera. Cuando Dirac se puso en pie y preguntó «¿es unitaria?», Feynman no supo qué quería decir. Después, cuando empezó a explicar su método de sumar amplitudes por cada camino y a dibujar trayectorias esquemáticas de las partículas, el gran Niels Bohr se puso en pie y dijo: «¿Es que ignora la lección fundamental de dos décadas de teoría cuántica? Esas trayectorias violan el principio de incertidumbre». Se acercó a la pizarra, indicó con un gesto a Feynman que se apartara y empezó a explicar. En ese momento Dick supo dos cosas: que su presentación había sido un desastre y que nadie, ni siquiera Bohr, había entendido nada de lo que había explicado. Por el contrario, Schwinger fue aclamado como el nuevo niño prodigio. Al terminar la reunión, ambos jóvenes físicos compararon sus resultados. Ninguno entendía las ecuaciones del otro pero los resultados eran idénticos. «Así supe que no estaba loco», diría tiempo después Feynman.

Por esas casualidades de la vida, al regresar Oppenheimer a su despacho de director del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton encontró sobre su mesa un sobre con una carta de un profesor de física de la Universidad de Tokio, Shin'ichiro Tomonaga: «Me he tomado la libertad de enviarle copias de unos cuantos artículos y notas…». Acto seguido envió un cable a Tomonaga apremiándole para que enviara un resumen de su trabajo mientras él acordaba su publicación en la revista *Physical Review*. El artículo apareció el 15 de julio. Wheeler también había puesto a trabajar como escribas a un grupo de jóvenes físicos para dar forma a las innumerables notas que había tomado durante la reu-

LOS SÚPER-MUCHOS-TIEMPOS DE TOMONAGA



Shin'ichiro Tomonaga.

Antes de la guerra, el físico japonés Shin'ichiro Tomonaga (1906-1979) había estudiado en 1937 con Heisenberg y había seguido los desarrollos de la QED de Dirac y Pauli. Cuando regresó a Tokio dos años más tarde había desarrollado una teoría que él llamaba de «los súper-muchos-tiempos». En ella asignaba a cada punto del campo su propio reloj, algo que resultaba muy manejable a pesar de lo absurdo que pudiera parecer tener que lidiar con un número infinito de coordenadas temporales. Esto le permitió introducir sin demasiadas complicaciones la relatividad en las ecuaciones, pues uno de los inconvenientes de la teoría cuántica no-relativista era que todos los puntos del campo electromagnético estaban asociados a un único reloj, lo que implicaba un tiempo absoluto, en total contradicción con el espíritu y la letra relativistas. Tomonaga realizó su investigación en total soledad y sus diarios reflejaban esa tristeza: «Recientemente me he sentido triste sin saber por qué, por lo que me fui al cine». En 1947, Tomonaga había resuelto el problema de los infinitos mediante un proceso que llamó «reajuste», siguiendo sin saberlo la propuesta de Kramers. Pero tuvo la suerte de enviarlo a quien era capaz de apreciarlo, Oppenheimer.

nión. Estos, que intentaban comprender lo que había dicho Schwinger, encontraron en el artículo de Tomonaga una refrescante y simple belleza: ahora entendían el trabajo del genio de Harvard y también que lo había complicado en exceso.

Oppenheimer en seguida se dio cuenta de que el camino de Schwinger ya lo había recorrido Tomonaga, aunque no en su totalidad: le faltaba todo el entramado matemático que había urdido el norteamericano. Rápidamente escribió a los asistentes a Pocono: «Justo porque hemos escuchado el precioso informe de Schwinger podremos ser capaces de apreciar este desarrollo independiente».

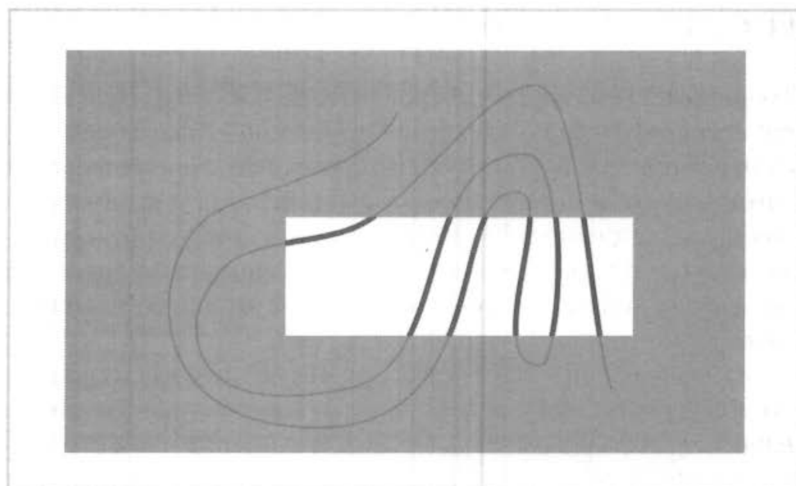
REGRESO AL FUTURO

El fracaso y la incomprensión por parte de sus colegas que significó el encuentro de Pocono para Feynman no le hizo desistir. De su trabajo con el efecto Lamb había entendido cómo domesticar esos infinitos que surgían por doquier en la teoría y, siguiendo su peculiar estilo de trabajo, lo había aplicado a muchos otros aspectos, siempre con éxito. Pero aún le quedaban muchas cosas que hacer antes de dar por terminada la construcción de esa nueva forma, muy original, de comprender la QED.

Lo primero que había hecho Richard Feynman con su teoría fue dar una explicación alternativa al mar de electrones de energía negativa que llenaba el universo de Dirac. Recordemos que son invisibles a nuestros detectores hasta que un fotón de radiación gamma de muy alta energía golpea a uno de ellos y lo trae a nuestro mundo. En ese instante se produce un par electrón-hueco, y ese hueco se comporta como un electrón con carga positiva, el positrón, la antipartícula del electrón. Este es el proceso que se conoce de creación de pares. En sentido inverso, cuando un electrón cae y rellena ese hueco, emite dos (o tres) fotones gamma, y lo vemos como una desintegración del electrón con el positrón. No era una idea muy atractiva para los físicos, pero no había otra interpretación y fue el único juego en el casino de la QED durante dos décadas.

El «truco» de Feynman estaba inspirado, como él mismo confesó en su discurso de aceptación del premio Nobel, en una llamada que recibió en el otoño de 1940 de su director de tesis, J.A. Wheeler: «Feynman, ya sé por qué todos los electrones tienen la misma carga y la misma masa». «¿Por qué?», preguntó Feynman. «¡Porque todos son el mismo electrón!», contestó Wheeler.

Esta idea casi absurda de Wheeler consistía en que un único electrón zigzagueando por el espacio-tiempo podría verse, en un momento dado, como muchos electrones en diferentes posiciones. Lo podemos explicar con una analogía bélica extraída de la Segunda Guerra Mundial: el visor de un B-27. Cuando el oficial bombardero miraba por él, veía una pequeña porción de todo el campo que estaba bajo sus pies. Imaginemos que en cierto instante se encuentra pasando por una zona donde existe un camino



Desde la estrecha visión de un bombardero, un mismo camino puede parecer varios.

que da muchas vueltas debido a lo inhóspito del terreno y hacemos una foto por el visor del bombardero (véase la figura): nos parecerá estar observando varios caminos totalmente diferentes, no el mismo recorrido.

Ahora bien, ¿cómo veríamos tener un electrón yendo hacia el pasado? Simplemente como un positrón viajando hacia el futuro. Así, los positrones no son más que electrones que van hacia atrás en el tiempo. La idea tenía una importante falla que Feynman apuntó con rapidez: si así fuera, en un momento dado el universo debía contener tantos electrones como positrones, pero eso no se observa. Nuestro mundo está hecho de materia, y la antimateria solo se produce en los rayos cósmicos (que es donde se detectó el positrón por vez primera) y más recientemente en los aceleradores de partículas. ¿Dónde están todos esos positrones extra? Wheeler le contestó que quizá se encontraran escondidos dentro de los protones.

A Feynman no le convenció la idea de que en el universo solo existiera un electrón, pero sí tomó mentalmente nota de lo segundo: un positrón es un electrón viajando al pasado. «¡Eso es lo que robé!» diría tiempo después. En 1949, Feynman presentó formalmente su interpretación de la antimateria.

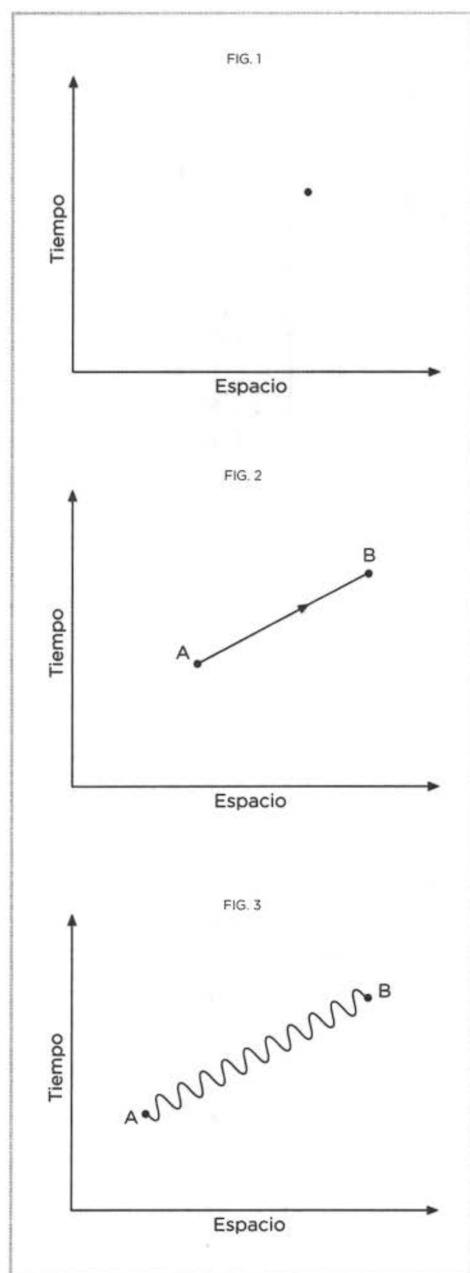
EL MUNDO SEGÚN FEYNMAN

Tomonaga y Schwinger, trabajando independientemente, habían introducido el primer método realmente válido de renormalización; por primera vez los teóricos podían calcular el efecto de las partículas virtuales de manera fiable y comparar sus resultados con los experimentos. Tales cálculos habían provocado una sensación de júbilo, pero no por ello significaba que fueran sencillos de realizar. Antes de las aportaciones de Schwinger y Tomonaga, Bethe se expresó con claridad: «los cálculos en el caso relativista no son fáciles... Hay que integrar aproximadamente veinte términos diferentes». Después de la reunión de Pocono la situación no había mejorado demasiado. Incluso había quien consideraba que los nuevos cálculos QED eran más complicados que los de antes.

Pero Feynman no desistía en su idea. Empezó a realizar dibujos simples que le ayudaran a seguir el camino a sus ecuaciones. Estos dibujos, que pronto se llamarían «diagramas de Feynman», proporcionaban lo que los métodos de Schwinger y Tomonaga eran incapaces de conseguir: sencillez y rapidez de cálculo. Los diagramas de Feynman iban a cambiar la forma en que se haría la física a partir de entonces.

Feynman presentó por primera vez sus diagramas en Pocono, pero nadie le entendió. Y no es de extrañar: rompía con todo lo que se había hecho hasta entonces. Para entenderlos, consideremos una hoja de papel en blanco en la que pintamos dos ejes perpendiculares entre sí: en el vertical representaremos el tiempo y en el horizontal, el espacio. De este modo se «proyecta» el mundo tridimensional de las interacciones cuánticas en una dimensión, lo que proporciona justo lo que Feynman siempre buscó en sus investigaciones: visualización. En este caso, la de los fotones y los electrones en el espacio-tiempo, que aparecen en los diagramas como trazos. Es por eso que Bohr reprobó esta representación, aunque tiempo después se disculpó ante Feynman por no haberle entendido en Pocono.

Aquí, cualquier suceso —como estar sentado en un banco del parque de nuestra ciudad a las dos de la tarde— se puede representar por un punto, pues se produce en un sitio y en un momento

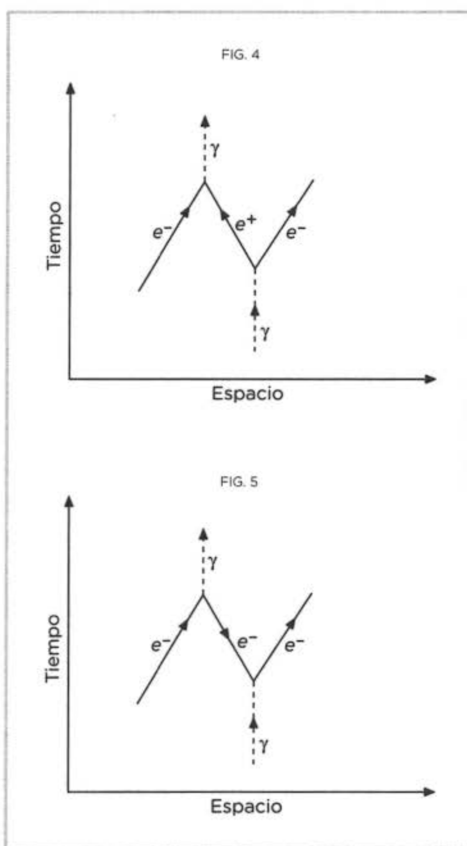


determinados (figura 1). Imaginemos ahora que ese punto es un electrón. Al pasar el tiempo y desplazarse desde A hasta B, se representa como se muestra en la figura 2. A esta línea que une el punto A de donde sale el electrón al B donde llega, se la llama *propagador*. Lo mismo se puede hacer con los fotones (figura 3).

El propagador no es una simple línea, sino que proporciona las instrucciones necesarias para calcular la probabilidad de que una partícula salga del punto A y tiempo después se encuentre en el punto B. La idea de Feynman era, como hemos visto, que una partícula no se mueve simplemente de un punto a otro por un camino determinado, sino que lo hace por multitud de ellos y todos contribuyen a la probabilidad de que la partícula vaya desde A hasta B, que viene dada por una expresión matemática particular.

Esto nos sirve para acercarnos a cómo Feynman interpretó la antimateria. Para él, un positrón era un electrón viajando hacia atrás en el tiempo. ¿Cómo explicamos entonces la figura 4? Desde el punto de vista tradicional de la QED, un fotón de alta energía se desintegra produciendo un par electrón-positrón. El positrón viaja por el espacio-tiempo hasta que se encuentra con otro electrón y ambos se aniquilan emitiendo un fotón gamma. Estamos ante lo que se llama un pro-

ceso de *creación-destrucción de pares*. Sin embargo, Feynman lo interpretó de otro modo (figura 5).



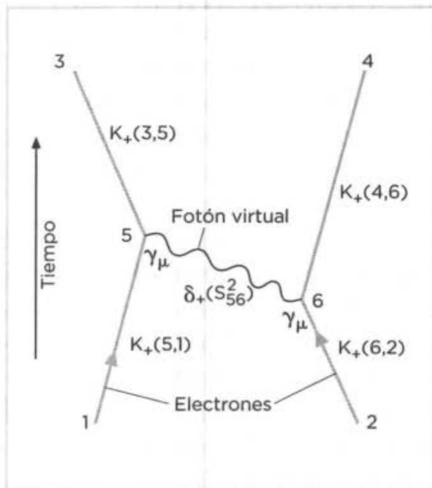
Recordemos que, según Feynman, un positrón es un electrón viajando hacia atrás en el tiempo. Entonces, el electrón, viajando hacia delante en el tiempo, emite un fotón y, al igual que sucede en el caso que hemos visto en la interacción entre electrones, el retroceso le obliga a viajar hacia atrás en el tiempo. Luego tiene una nueva interacción con un fotón, cambia su trayectoria y vuelve a viajar hacia delante en el tiempo. No tenemos dos electrones y un positrón sino el *mismo* electrón viajando adelante y atrás en el tiempo.

Feynman publicó sus ideas en detalle en dos artículos en la primavera de 1949: en el primero, «The theory of positrons», explicó su interpretación de la antimateria, y en «Space-Time approach to Quantum Electrodynamics» aplicó sus diagramas a la interacción fundamental entre dos electrones. En ellos puso las bases de todos los cálculos que tan exitosamente haría en los dos años siguientes.

DE LA INCOMPRENSIÓN AL ÉXITO

El problema es que incluso los físicos más cercanos a Feynman tenían problemas para entender cómo debía usarse este nuevo método. Los diagramas de Feynman no eran ni automáticos ni intuitivos para los físicos de finales de la década de 1940 y princi-

INTERACCIÓN ENTRE DOS ELECTRONES



¿Qué sucede cuando dos electrones interaccionan e intercambian un fotón virtual? La representación es la que se muestra en la figura, tomada de la original de Feynman. En este caso, el fotón es emitido en (6) y absorbido en (5) (los puntos donde confluyen electrón y fotón se llaman *vértices*). Pero es necesario tener en cuenta un detalle: este diagrama también sirve para estudiar el camino contrario: el fotón es absorbido en (6) y emitido en (5). Si el pasado se encuentra en la parte baja del diagrama y el futuro en la parte alta, esto significa que es absorbido *antes* de ser emitido, luego el fotón virtual (que no está obligado a cumplir la relatividad) viaja *hacia atrás* en el tiempo. Pero volvamos al proceso por el que dos electrones se repelen. El electrón de la izquierda tiene cierta probabilidad de ir de x_1 a x_5, y Feynman lo abrevió como $K_+(5,1)$. El otro electrón lo hace de forma similar de x_2 a x_6, de ahí el factor $K_+(6,2)$. Este segundo electrón podía emitir un fotón virtual en x_6. El fotón tiene cierta probabilidad de moverse de x_6 a x_5, lo que Feynman etiquetó como $\delta+(s^2_{56})$. Al llegar a x_5 el fotón puede ser absorbido por el electrón. La probabilidad de que un electrón pueda emitir o absorber un fotón virtual tiene también una expresión matemática única, derivada de la investigación realizada antes de la guerra, y que puede escribirse como $e\gamma_\mu$, donde e es la carga del electrón y γ_μ es un objeto matemático derivado de la teoría de Dirac. El electrón de la derecha, al transmitir parte de su energía y su momento (el producto de la masa por su velocidad), cambiará su movimiento de x_6 a x_4 (como sucede cuando el cazador experimenta el retroceso al disparar su rifle). El electrón de la izquierda, tras absorber el fotón y absorber su energía y su momento, se desvía de x_5 a x_3. En las manos de Feynman, este diagrama se convierte en la siguiente ecuación:

$$e^2\int\int d^4x_5 d^4x_6 K_+(3,5)K_+(4,6)\gamma_\mu\delta_+(s^2_{56})\gamma_\mu K_+(5,1)K_+(6,2).$$

pios de la de 1950. Quien puso orden fue Freeman Dyson, un joven físico de origen inglés que justo después de conocer a Richard Feynman escribió a sus padres: «es mitad genio, mitad bufón». Una descripción de la que tiempo después se arrepentiría.

> «Como los chips de silicio, los diagramas de Feynman llevaron la computación a las masas.»
>
> — Apreciación de Schwinger acerca de los dibujos que empleaba Feynman en sus investigaciones.

El primer encargo de Bethe fue que calculara cuál sería el valor del efecto Lamb en un electrón sin espín (esto es, el caso no-relativista), del cual Bethe acababa de hacer unos cálculos preliminares en el tren de regreso de la isla Shelter. Esto le acercó a Feynman y, al igual que sucede en las películas románticas, al principio ninguno de lo dos se tomó en serio el trabajo del otro. Pero un día Weisskopf, que se encontraba de visita en Cornell, explicó los titánicos progresos de Schwinger en Harvard y a Dyson se le encendió una luz de aviso: había algo que conectaba lo que ambos monstruos de la física estaban haciendo. Empezó a vislumbrar que había alguna base metodológica bajo los ramalazos de inspiración de Feynman. Escribió a sus padres: «Voy a aprender mucho de Bethe pero pienso que si me quedo aquí más tiempo descubriré que es con Feynman con quien más voy a trabajar». Sin embargo, esto no iba a ocurrir: en el otoño de 1948 y con las bendiciones de Bethe, Dyson marcharía al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, donde permaneció hasta su jubilación en 1994.

Llegaba el verano de 1948 y Feynman debía cumplir un ritual: desaparecer de la universidad dejando detrás una pila de exámenes por corregir, artículos por repasar y cartas de recomendación por escribir. Ese año tenía que resolver cierto asunto que arrastraba desde sus últimos meses en Los Álamos: dar por terminada una intensa relación a distancia con una secretaria con la que había comenzado a salir tras la muerte de Arline, algo que había provocado que otra mujer de Ithaca la emprendiera a golpes con

él loca de celos. Y mientras tanto, todavía otra mujer que, al parecer, dejó embarazada y luego abortó, reaccionó con más temple y le escribió para dejarle.

Por su parte, Dyson quería asistir a una serie de seminarios que iba a impartir Schwinger en Ann Harbor del 19 de julio al 7 de agosto, por lo que en junio se dispuso a cruzar todo Estados Unidos acompañando a Feynman en su Oldsmobile de segunda mano… y rogándole que soltara un poco el acelerador y bajara de los 105 km/h. El camino le sirvió para entender más las ideas de su compañero de viaje, pues de lo poco que le había escuchado en Cornell había sacado la impresión de que lo único que hacía era escribir las soluciones en lugar de resolver las ecuaciones como debía hacerse. La ruta 66, la Calle Principal de América, da para muchas confesiones y poco a poco Dyson fue descubriendo la verdadera aspiración de Feynman: no era la renormalización, sino su gran reinterpretación de la mecánica cuántica, la suma de historias. Dyson empezó a darse cuenta de la profundidad y el alcance del trabajo de su compañero de viaje. Cuando llegaron a Albuquerque, Feynman siguió su camino en busca de Rose McSherry para zanjar la relación y Dyson se dirigió a la estación de autobuses para tomar el primero que saliera para su cita con la teoría de Schwinger en la escuela de verano en Ann Arbor.

Una vez terminado el curso, Dyson tomó una serie de autobuses de regreso. El camino desde el medio oeste americano hasta las trece colonias es largo y Dyson lo aprovechó para reflexionar sobre la equivalencia entre la aproximación de Tomonaga y Schwinger y la de Feynman. Dyson estaba sorprendido de cómo un grupo de físicos japoneses, trabajando en total aislamiento, había conseguido semejante avance: «Tomonaga ha explicado sus ideas en un lenguaje claro y simple de manera que cualquiera puede entenderlo, y Schwinger no». También se dio cuenta de que podía reescribir las series perturbativas de Schwinger incluyendo ciertos objetos matemáticos que Feynman había utilizado y bautizado como «operadores cronológicos de orden». Durante una parada en Chicago fue capaz de derivar toda la teoría de Feynman de la de Schwinger. Una vez en casa, y durante los últimos días de aquel verano de 1948, trabajó con un nivel de concentración tan alto que,

FREEMAN DYSON

El físico y matemático inglés Freeman Dyson (1923) ha sido uno de los genios matemáticos de Inglaterra. Si hay un apelativo que lo defina es «subversivo», una de sus palabras favoritas según afirma su amigo, el neurocientífico Oliver Sacks:

> La palabra favorita de Freeman sobre hacer ciencia y ser creativo es subversivo. Cree que más importante que ser no-ortodoxo es ser subversivo, que es lo que ha hecho toda su vida.



Entró en Cambridge dispuesto a estudiar matemáticas, pero pronto cambió de idea. Un día, hablando con un ayudante de Dirac, este le dijo: «Dejo la física por las matemáticas; la encuentro poco rigurosa, confusa y esquiva». A lo que Dyson contestó: «Yo cambio las matemáticas por la física por las mismas razones». Pensaba que las matemáticas eran un juego interesante, pero no tanto como el mundo real. El mejor lugar para hacer física tras la Segunda Guerra Mundial era Estados Unidos, así que decidió mudarse. ¿Pero dónde? Le aconsejaron trabajar con Bethe y no se lo pensó más: iría a Cornell. Como extranjero en tierra extraña, al poco de llegar jugó su primera partida de póquer, experimentó el significado norteamericano de la palabra *picnic* e hizo su primer viaje en coche por «el país salvaje» (en realidad, un tranquilo viaje de Ithaca a Rochester, en el estado de Nueva York) acompañando a Richard Feynman, «el primer ejemplar que he encontrado de una especie rara, el científico nativo americano», según escribió a sus padres.

según sus palabras, casi le mata, pero al final encontró el fundamento matemático común a los enfoques de Feynman y Schwinger. En octubre, antes de que Feynman terminara su gran artículo sobre la QED, envió a la revista *Physical Review* el artículo titulado «The radiation Theories of Tomonaga, Schwinger and Feynman». Allí comenzaba bosquejando la ecuación de Tomonaga-Schwinger, que era básicamente la ecuación de Schrödinger dependiente del

tiempo, esto es, la ecuación que describe el movimiento de las partículas. Dyson también reconoció que el principio básico de la teoría de Feynman era «preservar la simetría entre el pasado y el futuro». Gracias a él, Dyson pudo probar que los elementos más desagradables de los cálculos de Schwinger se podían evitar, lo que convertía sus series perturbativas en algo mucho más manejable. Otra idea clave fue concentrarse en la matriz S, un objeto matemático que contiene todas las probabilidades asociadas a todos los diferentes caminos que van del estado inicial al final. Dyson demostró que cada uno de sus términos se podía representar por diagramas de Feynman. Es más, Dyson aseguraba que tales diagramas no debían verse como simples ayudas al cálculo, sino «como un gráfico de los procesos físicos que dan lugar a la matriz».

El resultado fue un desarrollo más fiable que el de Feynman y más comprensible y útil que el de Schwinger. Había proporcionado a la comunidad de físicos teóricos la justificación matemática para usar la teoría de Feynman en lugar del engorroso virtuosismo matemático del niño prodigio de Harvard. Es más, les había demostrado que la QED era renormalizable una vez que se controlaban los infinitos mediante los trucos matemáticos proporcionados por Feynman. Curiosamente, el artículo original de Dyson contenía un único diagrama espacio-tiempo. Y como los artículos de Feynman aún no habían aparecido, resulta paradójico que el primero de sus famosos diagramas fuera publicado en una revista científica por... Dyson. Pero no creamos que este trabajo fue mucho más comprensible que el de sus colegas. Quizá la mejor descripción de la situación a finales de la década de 1940 y principios de la de 1950 la diera el padre de Dyson, George, un célebre músico y compositor. Dijo que el trío Feynman-Schwinger-Dyson le recordaba cierta parte del credo de Atanasio, sustituyendo la palabra «omnipotente» del original por «incomprensible»: Igualmente incomprensible es el Padre, incomprensible el Hijo e incomprensible el Espíritu Santo; y, sin embargo, no son tres incomprensibles sino uno solo incomprensible.

El poderío de la formulación de Feynman y, sobre todo, el esfuerzo ímprobo de Dyson por explicar al mundo la utilidad de las ideas de su amigo y colega permitió que esos diagramas, que

comenzaron siendo una curiosidad únicamente entendida por su creador y un par de colegas en Cornell, pasaran a ocupar desde entonces un lugar muy central en la física teórica. Lo que surgió como un medio para poder manejar la QED, hoy se encuentra en prácticamente todos los campos de la física.

> «El mundo surgió de una condición más ordenada en el pasado que en el presente.»
>
> — Richard Feynman.

Eso sí, Feynman y Dyson tenían una visión distinta de lo que significaban estos diagramas. Para el primero, tal vez influido por el formalismo de la suma de trayectorias y su insistencia en ver las interacciones entre partículas sin la intervención de campos cuánticos, los diagramas eran imágenes reales de procesos físicos, donde los electrones podían moverse de un lado para otro y adelante y atrás en el tiempo. El trabajo de Dyson cambió todo esto. Demostró cómo los diagramas podían deducirse de un conjunto fundamental de ecuaciones de la teoría cuántica de campos. Para Dyson, cada parte de cada diagrama representaba un término en una serie de ecuaciones. Los diagramas ayudaban a dilucidar cuáles eran esas ecuaciones y las reglas que Feynman había desarrollado para traducir los diagramas a ecuaciones; no eran ad hoc, producto de una mente de prodigiosa intuición física, sino que se podían justificar mediante una serie de manipulaciones bien definidas de las ecuaciones asociadas a la mecánica cuántica y a la teoría especial de la relatividad.

Lo más curioso de todo es que Feynman no fue consciente de lo que tenía entre sus manos hasta enero de 1949, en el encuentro de la American Physical Society. Allí un físico llamado Murray Slotnick dio una charla, que fue aplastada por Oppenheimer cuando al final se levantó y anunció melodramáticamente al resto de los asistentes que los cálculos debían estar mal porque «violaban el teorema de Case». Slotnick no supo qué decir... ni nadie más en la sala porque se estaba refiriendo al trabajo de uno de sus posdoctorales, Kenneth Case, que ni tan siquiera había publicado

su teorema. Oppenheimer anunció que al día siguiente Case lo explicaría.

Feynman regresó al hotel y se puso a calcular para ver si Slotnick tenía razón. A la mañana siguiente fue a buscarlo y le dijo que él tenía razón y Oppenheimer estaba equivocado... Slotnick estaba alucinado: él había dedicado dos años al problema, incluyendo seis meses de largos cálculos, ¡y Feynman lo había hecho en solo una tarde! En este hecho estribaba la potencia de su formulación. Como escribió Dyson tiempo después en sus memorias: «Los cálculos que hice para Hans Bethe (sobre el efecto Lamb) usando la teoría ortodoxa me llevaron bastantes meses y cientos de folios. Dick llegó a la misma conclusión en una pizarra y en media hora».

Slotnick y Feynman se colocaron entre los asistentes para escuchar la charla de Case. Al finalizar, se puso en pie y dijo que confirmaba el resultado de Slotnick. Ya no se volvió a hablar más del teorema de Case.

Entonces fue consciente de que había creado algo muy potente. Con esa confianza que surge al tener razón, Feynman asistió junto con Dyson al tercero y último de los encuentros que comenzaran en la isla Shelter dos años atrás para resolver la QED. Esta vez el lugar escogido fue Oldstone-on-the-Hudson, a 65 km al norte de Nueva York. Entre el 11 y el 14 de abril de 1949 Feynman presentó sus ideas con su propia voz. Por fin le escucharon. El camino hacia una nueva forma de hacer física estaba expedito.

CAPÍTULO 4

Nuevo comienzo, nuevos retos: la superfluidez

Tras el triunfo de sus diagramas, Feynman sintió que debía cambiar de aires, tanto en lo personal como en lo profesional. Decidió pasar un año sabático en Brasil para regresar siendo profesor del Caltech, una institución que ya no abandonaría. Por otro lado, Feynman cambió las partículas por la física de la materia condensada; en particular, por el problema del helio superfluido.

Los investigadores norteamericanos, físicos incluidos, solían comenzar sus viajes al extranjero visitando diferentes ciudades europeas. Feynman, que había renegado del estilo de vida cultural de los ingenieros del MIT y el más artístico de Cornell, no iba a seguir los pasos tradicionales de sus colegas. De hecho, la primera vez que pisó Europa fue a los treinta y un años, cuando un congreso le llevó a París.

Sus ojos estaban puestos en Sudamérica y en el verano de 1949 aceptó pasar varias semanas en el recién inaugurado Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas en Río de Janeiro. Era su primer viaje al extranjero y los meses anteriores aprendió el portugués necesario para enseñar física y poder ligar con las mujeres de Copacabana. Allí, en las calles de Río, descubrió una forma de vida, un ambiente para el arte y la música desconocido en los rigores del academicismo que le fascinó; a partir de entonces prefirió viajar a Sudamérica y Asia antes que a cualquier otro lugar.

El embrujo de las calles y playas de Río hizo que el invierno siguiente pidiera al centro que le contratara permanentemente, al mismo tiempo que negociaba su contrato con Robert Bacher, un antiguo colega de Los Álamos, para entrar a formar parte del Centro Tecnológico de California, el Caltech. Según confesó, estaba cansado de Cornell, «de todas esas idas y venidas de una ciudad pequeña y del mal tiempo». También confesó a Bacher una de sus

particulares idiosincrasias: prefería no tener estudiantes de doctorado. Pero Bacher no le quería dejar escapar, así que le convenció para mudarse a Pasadena, no sin antes disfrutar de un año sabático en Río, de agosto de 1951 a junio de 1952. Fermi le escribió: «Ojalá pudiera refrescar mis ideas nadando en Copacabana».

Su vida investigadora pasaba en la habitación del hotel Miramar de Copacabana, donde hacía sus cálculos sobre los niveles energéticos de los átomos ligeros (hidrógeno, helio, litio...). Viviendo en un país donde quince años atrás la física no existía (ni en ningún otro país de Sudamérica), Feynman necesitaba estar en contacto con su país para obtener los datos experimentales que necesitaba. En una época muy anterior a Internet, su única vía de hablar con el Laboratorio de Radiación Kellogg del Caltech, pagado por las ganancias de este vendedor de cereales para el desayuno, era a través de un radioaficionado brasileño una vez por semana. «No estoy totalmente a oscuras en Brasil», escribió Feynman a Fermi.

Sin embargo, no nos encontramos ante un Feynman brillante, como él mismo reconoció:

> Trabajé mucho y lo que obtuve fue razonable... Sin embargo, llegué a la conclusión de que yo tenía tantos parámetros que ajustar que no puedo estar seguro de que mi trabajo resultara muy útil. Yo quería lograr una comprensión bastante profunda del núcleo, y nunca estuve demasiado convencido de que aquel trabajo fuera realmente importante.

Realmente, trabajar no trabajó demasiado.

UNA «GAROTA» DE COPACABANA

«Un americano en Río»; así podría titularse la película que Feynman pudo haber protagonizado en la ciudad del carnaval. A pesar de afirmar que había nacido sordo para la música, encontró un estilo que se ajustaba perfectamente a su forma de ser: dinámico, improvisado, caliente, desconocido. La samba no aparecía en la última edición de la *Encyclopaedia Britannica*, pero llegaba sin

problemas a sus oídos por la ventana del hotel. Al final se unió a una escuela, Os Farçantes de Copacabana, donde empezó intentando el *pandeiro*, y acabó con la *frigideira*, que tocaba con un acento extranjero que gustaba a otros músicos. Poco a poco fue tomando destreza y empezó a tocar en fiestas y, por supuesto, en el carnaval de 1952, donde un fotógrafo de una revista rosa local le sacó disfrazado de Mefistófeles.

Samba, bebida y mujeres, y no precisamente por ese orden, fueron las preferencias de Feynman en Río. Ese invierno bebió en exceso (hasta un día que se asustó y se prometió no volver a probar el alcohol nunca más) y ligó con bastante éxito en la playa, los clubes y en la recepción del hotel con las azafatas de Pan American que se alojaban en la cuarta planta.

Desde la muerte de Arline, Feynman se había entregado a un maratón sexual: sedujo a universitarias, frecuentó burdeles y se acostó con las mujeres de muchos de sus amigos. Las mujeres decían que les atraía su mente, su aspecto, su forma de bailar y la manera en que las escuchaba e intentaba entenderlas. En sus viajes profesionales a otros países sus colegas sabían que debían presentarle mujeres; estaba con ellas durante días y luego les enviaba una carta de despedida:

> Mi amor por ti es tan grande que estoy seguro que nos traería a ambos una gran felicidad... por favor, recuerda siempre, en el atardecer de tu vida... que estaré en algún lugar en el mundo y que te querré. Siempre te recordaré porque tú eres la única persona con la que he estado absolutamente a gusto.

Siempre le perdonaban. Sabían que por encima de todo estaba su trabajo y, extrañamente, eso le hacía más atractivo a sus ojos.

En medio de esa vorágine de música, sexo y alcohol escribió a Mary Louise Bell, a quien había conocido en una cafetería de Cornell, para que se casara con él. Lo hicieron a su regreso de Brasil, en junio de 1952, y acto seguido se fueron de luna de miel a México y Guatemala. Ninguno de sus amigos entendió esa boda. A sus espaldas la llamaban «la chica con el pelo de celofán» y estaban convencidos de que ella no le apreciaba lo más mínimo:

solía decir que estaba casada con un ignorante que tenía un doctorado. Le cambió su forma de vestir hasta tal punto que sabían si ella estaba cerca porque llevaba una pajarita. La miraban con malos ojos, pues ella rehuía las reuniones sociales con físicos: incluso Feynman perdió la oportunidad de encontrarse con Niels Bohr, que estaba de visita en Pasadena, porque le dijo que esa tarde no la iba a pasar con un viejo pesado. No es de extrañar que muchos de sus amigos se preguntaran cómo era posible que se hubiera casado con una mujer así.

«No sé qué le pasa a la gente: no aprenden comprendiendo; aprenden de alguna otra forma, por la rutina, o de algún otro modo. ¡Que frágil es su conocimiento!»

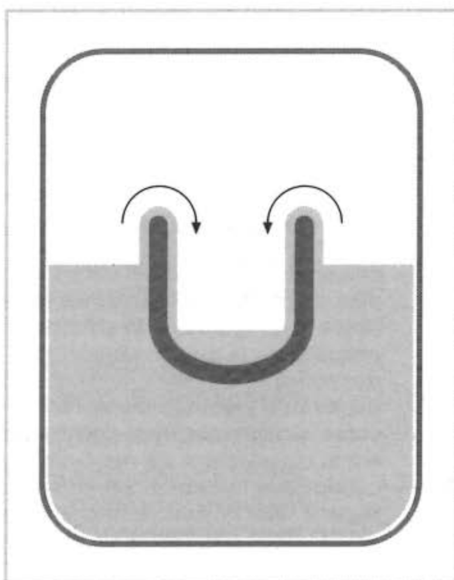
— Richard Feynman, sobre la forma de enseñar en las universidades de Brasil.

El matrimonio no podía durar. Cuatro años más tarde, en 1956, firmaron un acuerdo de divorcio que hizo las delicias de la prensa. No porque Feynman fuera una persona pública, sino por el motivo aducido, crueldad extrema: «Un profesor toca los bongós y hace cálculos en la cama», «Calcula conduciendo, mientras está sentado en el salón de su casa, al acostarse por las noches». Feynman firmó que «sin provocación, justificación o excusa de cualquier tipo infligió un gravoso sufrimiento físico y mental». Y con una pensión de diez mil dólares en tres años terminó un matrimonio que nunca hubiera tenido que producirse.

VISCOSIDAD CERO

Todos los líquidos presentan oposición al fluir: es la viscosidad, producto de las fuerzas de rozamiento que aparecen entre las propias moléculas del líquido y entre estas y las de la superficie sobre las que resbalan. Algunos, como el champú o la miel, son muy viscosos. Otros, como el agua, no lo son tanto. Más radical es el cam-

bio del helio líquido por debajo de –271 °C: su viscosidad prácticamente desaparece, convirtiéndose en superfluido (véase la figura). Esto hace que podamos ver cómo el helio literalmente sube por las paredes del vaso que lo contiene y se derrama en el exterior y «se cuela» tranquilamente por agujeros de un tamaño inferior a dos diezmilésimas de milímetro.



El helio superfluido sube por la pared del recipiente hasta que alcanza el mismo nivel dentro y fuera del mismo.

Sin viscosidad, sin fricción, el helio líquido podía fluir eternamente dando esperanzas a quienes durante siglos han intentado encontrar el móvil perpetuo. Curiosamente, la naturaleza había proporcionado otro tipo de móvil perpetuo que era bien conocido por los físicos cuánticos: el movimiento de los electrones alrededor del núcleo atómico. Ningún tipo de fricción ni disipación de energía aparece cuando los electrones se encuentran en sus orbitales atómicos. ¿Estaría ahí la solución? ¿Podría trasladarse el lenguaje cuántico, propio y aparentemente exclusivo del mundo microscópico, al que ven nuestros ojos? ¿Sería cierto que una cantidad apreciable de líquido se encuentre en un único estado cuántico, como el electrón en el núcleo?

Los físicos de materia condensada, con el soviético Lev Landau a la cabeza, habían desarrollado unas cuantas ideas que parecían poder ser de utilidad para comprender el fenómeno. Una de ellas era la noción de que existían unas nuevas entidades llamadas cuasipartículas o excitaciones elementales, movimientos colectivos que viajaban a través de la materia e interaccionaban unos con otros como si fuera partículas de verdad. Una de estas cuasipartículas es el fonón, una onda sonora cuántica. El helio líquido parecía contener, decía Landau, unidades mínimas de rotación que llamó *rotones*. Feynman estaba fascinado por estos fenómenos del helio líquido y decidió dedicarse a dar una explicación a su manera, a partir de primeros principios. Solo pudo con uno.

SUPERFLUIDEZ Y SUPERCONDUCTIVIDAD



Heike Kamerlingh Onnes.

En 1908, el físico neerlandés Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) consiguió licuar el helio. Sin lugar a dudas, se trataba de un gran logro teniendo en cuenta que el helio hierve a -269 °C y por aquel entonces los métodos de criogenización eran demasiado rudimentarios (el helio posee la temperatura de ebullición más pequeña y a la presión atmosférica normal nunca se congela). Al medir su conductividad eléctrica Onnes encontró, como se esperaba, que cuanto menor era la temperatura del mercurio, mejor conducía la corriente. Sin embargo, al llegar a -269 °C descubrió que su resistencia eléctrica desaparecía por completo: Kamerlingh Onnes acababa de descubrir la superconductividad. Contra todo pronóstico, al físico neerlandés se le pasó por alto una de las propiedades más sorprendentes del helio líquido. En 1938, el físico ruso Pyotr Kapitsa (1894-1984) y los canadienses John Allen (1908-2001) y Austin Misener (1911-1996) encontraron que por debajo de -271 °C el helio líquido se convertía en un excelente conductor del calor, doscientas veces mejor que el cobre. Y no solo eso, sino que presentaba una viscosidad inferior a una diezmilésima de la que tiene el hidrógeno gaseoso: es el fenómeno de la superfluidez.

Nuevos desafíos

La superfluidez y la superconductividad del helio eran dos fenómenos que desafiaban a los teóricos. «Son como dos ciudades asediadas... completamente rodeadas de conocimiento pero aun así se mantienen aisladas e inatacables», comentaba Feynman. Y eso teniendo en cuenta que dos grandes mentes, una a cada lado del telón de acero, estaban utilizando su mejor artillería: el soviético Lev Landau y el nacionalizado norteamericano Lars Onsager. Nacido en Noruega, Onsager, químico de la Universidad de Yale era famoso entre los estudiantes por la dureza de sus clases de mecánica estadística, a las que solían referirse irónicamente como Noruego I y Noruego II. Por su parte, Landau sometía a diez exámenes extenuantes al estudiante que quería trabajar con él. Si los pasaba, apuntaba su nombre en una libretita. Muy pocos lograban esa distinción.

HIDRODINÁMICA CUÁNTICA

Hasta su llegada al mundo de la materia condensada, a nadie se le había ocurrido aplicar la mecánica cuántica para derivar de manera directa las propiedades generales de la transición que lleva al helio de ser un líquido normal a su estado superfluido, a pesar de que todo el mundo sabía que la mecánica cuántica debía jugar un papel crucial en el fenómeno. De hecho, la explicación a que el helio sea el único elemento que no solidifica a ninguna temperatura viene de la teoría cuántica.

Debido a las fluctuaciones cuánticas, un sistema jamás va a poder encontrarse en un estado de energía cero. Según la física clásica, átomos y moléculas se encuentran en una continua vibración salvo cuando se alcanza el cero absoluto (–237,16 °C); entonces se detiene todo movimiento. Pero si tenemos en cuenta las leyes de lo muy pequeño, esto no puede ser así: lo prohíbe el principio de incertidumbre de Heisenberg. Por eso, incluso en el cero absoluto, los átomos de helio tiemblan, aunque sea muy débilmente. Ahora bien, la atracción que aparece entre dos átomos de helio es muy pequeña; tanto, que esa escasísima energía que posee en el estado fundamental en el cero absoluto es suficiente para impedir que se unan formando una red sólida. Podríamos preguntarnos si esto sucede también con el hidrógeno, el elemento más ligero del universo, y la respuesta es no: la energía de la unión que aparece entre los átomos de hidrógeno es mayor que las fluctuaciones cuánticas asociadas al cero absoluto; el hidrógeno sí solidifica.

En 1938, Fritz London había sugerido que la transición a la superfluidez podría ser un ejemplo de un fenómeno que describieran Einstein y el hindú Satyendra Nath Bose. A temperaturas normales, los átomos de un gas se distribuyen por todo el volumen del recipiente que los contiene. Pero a temperaturas extremadamente bajas, del orden de unas pocas mil millonésimas de grado por encima del cero absoluto, los átomos pierden su identidad individual (resulta imposible distinguirlos) y se comportan como si fueran un único «superátomo»: es el condensado de Bose-Einstein (CBE), el estado de la materia que se encuentra por debajo del sólido (en 1995, un grupo del Joint Institute for Laboratory

Astrophysics en Boulder, Colorado, consiguió enfriar dos mil átomos de rubidio por debajo de cien mil millonésimas de grados absolutos durante diez segundos, creando el primer condensado de Bose-Einstein de la historia). Dicho de otra forma, todos los átomos se encuentran en un único estado cuántico y, por tanto, su comportamiento sigue las reglas mecanocuánticas y no las de la física clásica. El problema es que el CBE solo sucede en el caso de un gas ideal, esto es, un gas en el que no existe ningún tipo de interacción entre sus moléculas (salvo los inevitables choques entre ellas) y en el caso del helio, aunque muy débiles, aparecen fuerzas de atracción a distancia. Ahora bien, ¿es posible que aun así aparezca en el helio una transición a CBE?

Feynman estaba decidido a entender este atípico comportamiento. Para ello utilizó la herramienta que tan buenos resultados le había dado en el caso de los fotones y los electrones: la suma sobre caminos. Creía que le proporcionaría el entorno perfecto para describir los fenómenos microscópicos que gobernaban el helio líquido a bajas temperaturas.

Para adentrarse en esta jungla de frío extremo, Feynman tenía en la mano su machete de la suma sobre los caminos de cada partícula y en su mente dos principios-guía: uno, que los átomos de helio son bosones, esto es, partículas con espín entero, lo que implica que el aspecto global del sistema no cambia si intercambiamos las posiciones de cualquier par de átomos de helio. Esto tiene una implicación fundamental en el planteamiento de Feynman de sus integrales de camino: las trayectorias que dominan la integral de camino (esto es, aquellas que minimizan la acción) donde las partículas individuales regresan a su posición inicial se deben tratar como iguales a aquellas donde la configuración final se parece a la inicial, pero en las que algunas partículas han intercambiado posiciones con otras. El segundo factor tiene que ver con el movimiento de un átomo de helio en relación con los de su entorno. Recordemos que la acción asociada a cualquier trayectoria está relacionada con la suma de las diferencias entre la energía cinética y la potencial a lo largo de todos los puntos del camino. Si el átomo se mueve despacio, sus vecinos harán lo propio para apartarse de su camino y adquirirán energía cinética que contri-

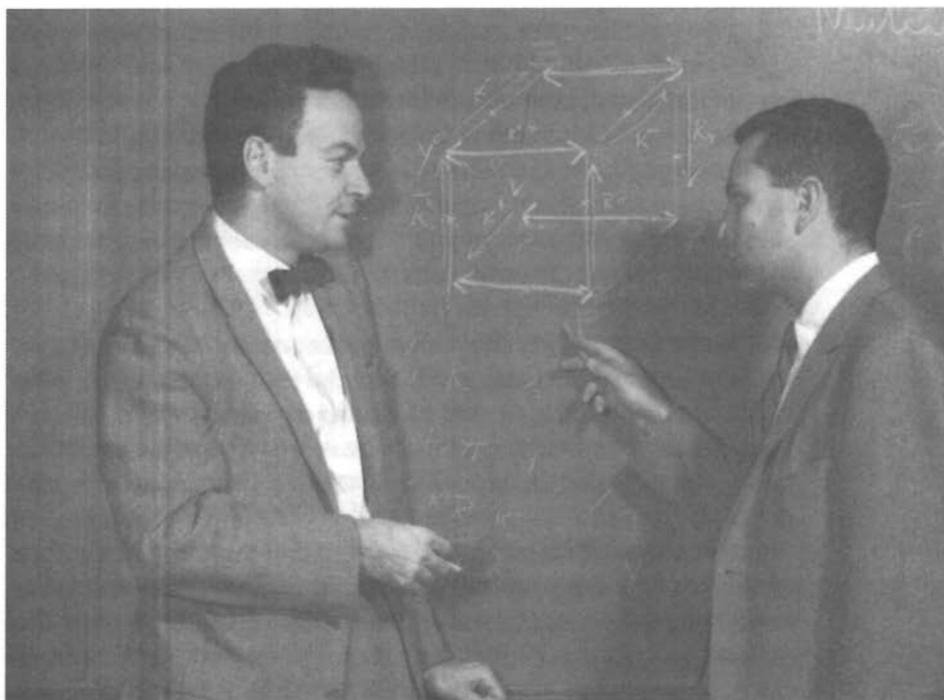




FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Richard Feynman en octubre de 1965.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
El físico indio Satyendra Nath Bose, responsable, junto a Einstein, del condensado de Bose-Einstein.

FOTO INFERIOR:
Feynman (izquierda) debatiendo un problema en la pizarra hacia 1950.



buirá a la acción. Pero su energía cinética depende de la velocidad a la que se mueven, y esta velocidad está relacionada con la del primer átomo de helio. El efecto neto de todo este baile era similar a cambiar la masa del átomo de helio en cuestión. Feynman demostró que las trayectorias que más contribuyen a la suma de los caminos eran aquellas en las que cada partícula se movía como si fuera una partícula libre, pero con una masa un poco más grande.

«Cuando estás solucionando un problema, no te preocupes. Ahora, después de que has resuelto el problema, es el momento de preocuparse.»

— Richard Feynman.

La fuerte repulsión atómica a cortas distancias quedaba así incluida en la representación y podía ignorarse en el resto de los cálculos. Esta forma de verlo convertía al helio en un sistema de partículas libres, luego la descripción de un gas ideal de Bose-Einstein es absolutamente acertada y la transición a un CBE era posible. Feynman demostró, además, que esta manera de describir el comportamiento del helio servía también para cualquier otro sistema de partículas que interaccionasen fuertemente entre ellas. Su trabajo iba mucho más allá de una mera descripción de un fenómeno de la física de materia condensada:

> Este principio puede usarse en otras ramas de la física, por ejemplo la física nuclear. Aquí tenemos el hecho desconcertante de que nucleones solitarios a veces actúen como partículas independientes a pesar de las interacciones fuertes. Los argumentos que hemos dado para el helio pueden aplicarse también a este caso.

Así lo expresaba en el primer artículo que publicó sobre el tema. Tenía en mente entender el mundo de los mesones, donde sus diagramas parecían ser totalmente inservibles. Intuyó que para comprender las propiedades de los mesones, que venían con una confusa situación experimental, debía rebuscar en las propie-

dades de los electrones y los átomos en materiales densos, pues proporcionaban un problema similar pero, a diferencia del anterior, la situación experimental era mucho más clara.

ROTONES Y REMOLINOS

Feynman había demostrado cómo la transición al estado superfluido del helio podía entenderse como un CBE, pero no había resuelto el problema. Nuestro mundo cotidiano está a salvo de las paradojas cuánticas porque los átomos y partículas interaccionan con el entorno y las destruyen. Así que condensar un sistema en un estado cuántico microscópico es una cosa, pero ¿por qué la menor perturbación no destruía ese estado? ¿Qué mantenía al helio superfluido?

La respuesta hasta ese momento era simplemente «fenomenológica». Es decir, los físicos se habían dedicado a observar con cuidado el helio superfluido y, a partir de los datos obtenidos, inferir cuáles eran las propiedades microscópicas del sistema que reproducían los resultados experimentales. A primera vista puede parecer que tenemos una explicación física completa, pero no es así: una cosa es deducir las propiedades microscópicas de los experimentos y otra muy diferente es explicar por qué la naturaleza tiene esas propiedades. Esto era lo que quería hacer Feynman.

Lev Landau había propuesto el modelo fenomenológico correcto. Defendía que la persistencia de la superfluidez era debido a que no existía ningún otro estado de baja energía accesible cerca del CBE que las perturbaciones pudieran sacarlo de ser un fluido cuántico. Al no existir esa nueva situación, las partículas individuales no pueden cambiar su estado de movimiento como resultado de cualquier colisión, y el superfluido continuará moviéndose uniformemente lo mismo que un electrón en la órbita de un átomo. En un líquido normal, las moléculas del fluido chocan entre sí, con las impurezas, con las paredes... Estas interacciones cambian el estado de movimiento de los átomos y de este modo disipan energía haciendo que el fluido se ralentice.

Feynman quería demostrar, a partir de primeros principios, que la conjetura de Landau era correcta. Aquí el hecho crucial era que los átomos de helio son bosones, lo que implica que el estado de un conjunto de átomos de helio es el mismo aunque cambiemos posiciones entre ellos. El argumento de Feynman era que a causa de la repulsión de corto alcance que existe entre los átomos de helio, el estado fundamental de mínima energía es aquel en el que el líquido se encuentra esencialmente a una densidad constante. Ahora bien, ¿por qué no hay otro estado de baja energía? Recordemos que en mecánica cuántica toda partícula puede verse como una onda de probabilidad cuya energía depende de la longitud de onda (la distancia entre dos crestas consecutivas), de modo que aquellas funciones de onda que varían mucho en poco espacio poseen más energía que las que no. Esto es debido al principio de incertidumbre, pues si una onda cambia de su valor más alto al más bajo en poca distancia, obtenemos con mayor precisión la posición de la partícula, lo que hace que su momento, y por tanto su energía, sea mayor. Entonces, la clave está en encontrar un estado cuántico de baja energía que tenga una función de onda sin demasiadas oscilaciones poco espaciadas.

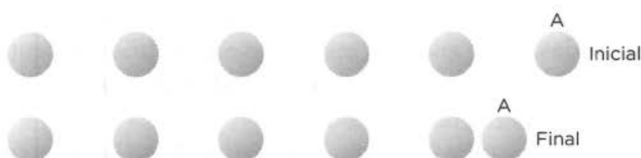
Feynman razonó de este estilo. Imaginemos que movemos un átomo en un punto A a una distancia lejana, a un punto B. Si la nueva configuración debe tener densidad uniforme, los otros átomos deben reorganizarse y algún átomo debe moverse para ocupar el sitio que ha quedado vacío. Al mover un átomo muy lejos estaríamos tentados a creer que el estado resultante debe ser muy diferente del inicial, pero estaríamos olvidando que hablamos de bosones: aunque intercambiemos átomos de helio muy separados entre sí, seguiremos teniendo la misma configuración porque lo único que hacemos es intercambiar bosones idénticos (figura 1). Únicamente habrá cambios en la función de onda si el desplazamiento de A es más o menos la mitad de la distancia media entre partículas vecinas. En este caso sí tendremos una configuración distinta de la inicial (figura 2).

Esto implica que las oscilaciones que podemos introducir en la función de onda para describir un nuevo estado del sistema no pueden ser mayores que la distancia interatómica promedio. Pero a esta

FIG. 1



FIG. 2



escala estamos en estados que poseen una mayor energía, muy alejados de la que tienen disponible los átomos de helio en las temperaturas de la superfluidez, luego jamás serán accesibles al sistema.

De este modo Feynman demostraba de forma elegante que la estadística de Bose-Einstein implicaba que no había estados excitados de baja energía fácilmente accesibles por el movimiento de los átomos. El estado de superfluidez se mantendrá mientras la energía térmica del sistema sea menor que la diferencia entre el estado fundamental y el siguiente estado excitado de menor energía. Y usando su formalismo de la integral de caminos, pudo estimar la energía de esos estados excitados.

DOS LÍQUIDOS EN UNO

Antes de que Feynman se dedicara a trabajar en este tema, el húngaro László Tizsa, profesor emérito en el MIT, había propuesto el modelo de los dos fluidos para describir la transición entre el líquido normal y el superfluido. En el cero absoluto, todo el helio es superfluido. A medida que se va calentando aparecen algunas ex-

citaciones que se mueven por el superfluido que podrían colisionar con las paredes del recipiente y disipar energía, actuando como la componente de fluido normal. Si calentamos más, aparecen más excitaciones hasta que al final la componente de fluido normal ocupa todo el volumen.

Con sus estimaciones a partir de primeros principios, Feynman fue capaz de reproducir este panorama, pero pasaron treinta y dos años antes de que se pudieran hacer los cálculos suficientemente exhaustivos como para obtener un acuerdo con los datos experimentales. Esto sucedió en 1985, usando un supercomputador que calculó detalladamente las integrales de camino que Feynman solamente había aproximado.

Pero el más grande ejercicio de prestidigitación física que realizó Feynman fue la solución del siguiente problema: ¿Qué sucede si un recipiente con helio superfluido gira? Puede parecer una pregunta banal... hasta que uno se pone a pensar en ella. Debido a la naturaleza del estado fundamental y la energía necesaria para alcanzar los estados excitados, el estado de superfluidez debe ser «irrotacional», lo que significa que no pueden aparecer remolinos que impidan el flujo de corriente. ¿Pero qué sucede si ponemos a girar el fluido porque hacemos girar el recipiente?

Feynman llegó a la conclusión de que el fluido como un todo no podía rotar, pero muchas regiones pequeñas, del orden de unos cuantos átomos de diámetro, podían hacerlo alrededor de su propia zona central. Estas regiones se alineaban verticalmente para formar líneas de vórtex, como los embudos de un tornado o los remolinos que se forman alrededor del desagüe: estamos ante los rotones de Landau.

Todo este virtuosismo matemático es impresionante, pero lo verdaderamente importante del trabajo de Feynman fue que cambió la manera de pensar de los físicos en este campo. Su forma de ir probando diferentes funciones de onda para explorar cuáles poseían la mínima energía puso de relieve la utilidad del llamado «método variacional», que desde entonces se ha utilizado para tratar los principales problemas en el estudio de la materia.

CAPÍTULO 5

De los átomos a los quarks

En la década de 1950, la física se enfrentaba a un nuevo reto. Poner orden en la enorme cantidad de partículas nuevas que los aceleradores iban escupiendo, además de comprender perfectamente el tipo de fuerzas que estaban en juego entre ellas, en particular la complicada fuerza débil, responsable de la desintegración del neutrón. Feynman, tras su paso por la materia condensada, estaba dispuesto a regresar a su campo. Para ello contó con un poderoso aliado, Murray Gell-Mann.

El 20 de diciembre de 1947 la revista *Nature* publicaba dos fotografías. Eran dos sucesos llamados «en V», debido a su forma característica. Estos se producen, por ejemplo, al desintegrarse una partícula neutra, sin carga (que no dejan huella en una cámara de niebla), en dos de cargas eléctricas opuestas (que sí la dejan). Eso era lo que parecía indicar la primera fotografía. La segunda mostraba la trayectoria de una partícula cargada que en un determinado momento cambiaba bruscamente de trayectoria. Para el ojo experto de un físico de partículas, lo que había sucedido era que había quedado registrado el paso de una partícula cargada que se había desintegrado en dos, una de las cuales era neutra (por lo que no dejaba huella de su paso en el detector) y la otra tenía la misma carga pero, obviamente, distinta masa que la partícula madre (de ahí su diferente trayectoria). ¿Qué era lo que estaba pasando?

Se bautizó a la partícula como Λ (léase lambda), y lo que llamaba la atención era que su vida media era más larga de lo esperado. En general, el tiempo «natural» de vida de las partículas que participan de la interacción fuerte es de 10^{-24} segundos, pero el de la partícula Λ se iba a unos largos 10^{-10} segundos. Y lo más misterioso es que no era la única que se comportaba de esta forma. El tema se convirtió en moda y fue lo suficientemente importante como para que la sesión de la Bienal Internacional sobre Radiación Cósmica de 1953 celebrada del 5 al 11 de julio en la localidad fran-

MURRAY GELL-MANN

Cuando tenía catorce años, Murray Gell-Mann, nacido en Nueva York el 15 de septiembre de 1929, fue catalogado como «el más estudioso» por sus compañeros del colegio Columbia Grammar, situado en el Upper West Side de Manhattan. Desde pequeño Gell-Mann demostró un enorme interés por la lingüística, hasta el punto de que con los años acabó convirtiéndose en un experto fonetista capaz de corregir la pronunciación a cualquiera en su propia lengua. En cierta ocasión, Feynman estaba redactando unas palabras en samoano para un cameo como jefe tribal en el musical *Al sur del Pacífico* que estaban preparando en el Caltech, y comentó resignado a un amigo: «La única persona que sabrá que lo estoy pronunciando mal es Murray». Gell-Mann no descubrió su vocación por la física hasta que fue a la universidad. Se trató de una llegada bastante deprimente para quien había sido considerado en el colegio como un prodigio: Yale solo le aceptaba en matemáticas, Harvard lo hacía si se pagaba la matrícula completa y Princeton ni siquiera le admitía. Así las cosas, con el corazón roto, decidió estudiar en el MIT, donde se matriculó en 1948, justo cuando llegaba la cresta de la ola de la electrodinámica cuántica. Su tutor, Victor Weisskopf, le advirtió que el futuro pertenecía a Feynman, así que se puso a estudiar con ahínco todos sus artículos. Al terminar esta inmersión cuántica se hizo una visión muy personal de los artífices de la QED: Feynman le impactó con su lenguaje directo, Schwinger le pareció vacío y pomposo y Dyson, ordinario y descuidado. Después de doctorarse a los veintiún años y pasar un curso en el Instituto de Estudios Avanzados, marchó a trabajar con Fermi en la Universidad de Chicago. Por entonces, la física de partículas necesitaba encontrar algún tipo de orden en los resultados que surgían de los aceleradores de partículas: a medida que progresaba la investigación aparecían más y más partículas. En este orden de cosas, la situación podría calificarse de caótica: el finlandés Matt Ross describía cuarenta y una partículas diferentes en la revista *Review of Modern Physics*. Hablar de «partículas elementales» era motivo de guasa.



El rey Gustavo VI Adolfo de Suecia saluda a Murray Gell-Mann (derecha) tras entregarle el premio Nobel de Física de 1969.

cesa de Bagnères-de-Bigorre, cerca del Pic du Midi, estuviera prácticamente consagrada a estas nuevas partículas, que ya merecían el apodo de «extrañas». Tal era el clima que la primera página de las actas del congreso anunciaba: «Las partículas descritas en este congreso no son totalmente ficticias, y toda analogía con partículas existentes en la naturaleza no es una pura coincidencia». Para los casi cuatrocientos físicos que allí se reunieron representó un momento importante de sus vidas. La existencia de las partículas «extrañas» era francamente escandalosa: «Era como si la naturaleza se permitiera fantasías, como si pudieran existir nuevos fenómenos sin estar realmente integrados en la marcha del mundo», comentó el físico francés Michel Crozon. Al poco de terminar el congreso, un joven físico llamado Murray Gell-Mann, de la Universidad de Chicago, introducía el concepto de extrañeza, una nueva cualidad de las partículas subatómicas. ¿Qué hacía ahí? Y lo que era más acuciante: ¿Cómo integrarla en un esquema coherente?

EXTRAÑEZA

Desde hacía una década los físicos creían entender moderadamente bien las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza: la gravedad, que gobierna el mundo de los planetas y las estrellas; la electromagnética, que domina las reacciones químicas y los procesos eléctricos; la fuerza fuerte, responsable de mantener unidos los protones y neutrones en el núcleo atómico; y la fuerza débil, que da cuenta de los lentos procesos de la desintegración radiactiva. Cada una de ellas jugaba en su propio patio, perfectamente definido. Pero entonces los aceleradores empezaron a escupir partículas Λ en cantidades nada despreciables. ¿Cómo era posible que en el bien estructurado campo de las partículas apareciera una que su creación pareciera estar bajo la batuta de la fuerza fuerte, pero su desintegración apuntara a que estaba gobernada por la fuerza débil? ¿A qué era debida esta mezcla?

Para explicarlo, Gell-Mann propuso en 1952 la existencia de una nueva característica fundamental del mundo subatómico, que

inicialmente llamó *y*. Era un nuevo tipo de carga. Ahora bien, y aquí residía lo revolucionario de su teoría, esa carga *y* no se comportaba como lo hace la carga eléctrica. En este caso, sea lo que sea lo que suceda en el mundo, la carga eléctrica se conserva. Esto es, si al principio de cualquier proceso la carga total del sistema es cero, al final también debe ser cero. Por eso el neutrón, que es una partícula neutra, se desintegra en un protón (con carga positiva), un electrón (de carga negativa) y un antineutrino (sin carga). Sin embargo, en el caso de la carga *y*, Gell-Mann propuso que se conservaba... a veces. De hecho, su hipótesis, que fue madurando en una serie de artículos que empezó a publicar en agosto de 1953, era que *y* se conservaba en aquellos procesos en los que intervenía la fuerza fuerte, pero no lo hacía si la fuerza responsable era la débil. De este modo explicaba por qué los mesones se producían por interacción fuerte pero se desintegraban débilmente.

«Nuestro conocimiento de la física fundamental no posee ninguna idea valiosa que no lleve el nombre de Murray Gell-Mann.»

— Declaración de Feynman en reconocimiento a la labor de Gell-Mann.

Su argumento fue el siguiente: como *y* se conserva, las partículas que se producen en la desintegración deben aparecer por pares partículas-antipartículas, con el mismo valor pero de signo distinto. Las partículas serían estables porque decaer en partículas no-extrañas violaría este principio de conservación si solo operase bajo la piel de la experiencia la fuerza fuerte. Pero si interviene la débil, responsable de la desintegración del neutrón, esta ley de conservación no tiene por qué cumplirse y podrán desintegrarse. Es más, por esa misma razón su vida media será más larga, que es lo que se observa.

Gell-Mann se dio cuenta de que el número cuántico *y* también servía para clasificar las partículas, e incluso hizo una predicción increíble: la partícula K^0, o kaón (neutro), debía tener una antipartícula que era diferente de la anterior. Esto era una propuesta bastante inusual, pues se pensaba que las partículas neutras, como el fotón, eran equivalentes a su correspondiente

antipartícula. El descubrimiento de que tenía razón lanzó la reputación de este joven físico y futuro premio Nobel al estrellato. El siguiente paso de Gell-Mann fue romper con la tradición no escrita de la física a la hora de poner nombre a esa nueva carga: la identificó con un número cuántico llamado «extrañeza», y las partículas asociadas recibieron el nombre de «extrañas». Semejante bautizo no gustó a los editores de la revista *Physical Review Letters*, que no dejaron que apareciera la expresión «partículas extrañas» en el título del artículo.

Con el comienzo del nuevo año el Caltech le hizo una oferta y Gell-Mann aceptó, instalándose en un despacho justo encima de Feynman. Con veintiséis años se acababa de convertir en el profesor titular más joven de la historia de dicho instituto. En opinión de muchos, el Caltech tenía ahora en nómina a las dos mejores mentes de la física de la época. La admiración profesional que se profesaban era recíproca.

Murray expresó con las siguientes palabras su impresión sobre Feynman:

> Lo que siempre me gustó del estilo de Richard fue la ausencia de pomposidad en su presentación. Estaba cansado de teóricos que disfrazaban su trabajo con lenguaje matemático o inventaban envoltorios excesivamente pretenciosos para lo que eran unas modestas contribuciones. Las ideas de Richard, a menudo potentes, ingeniosas y originales, las presentaba de una forma tan directa que me parecía totalmente refrescante.

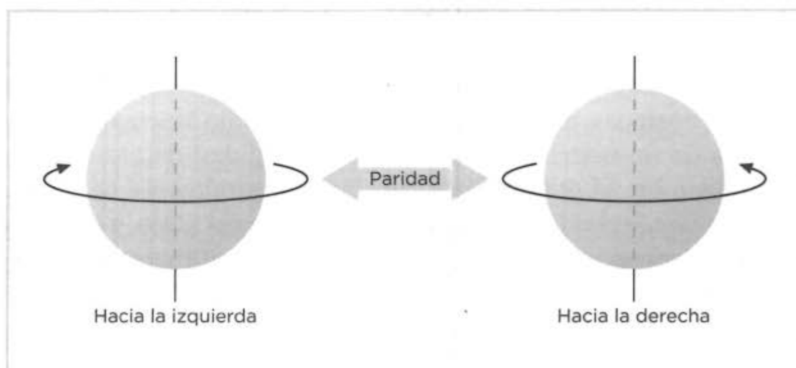
Como no podía ser de otro modo, empezaron a colaborar. Podían discutir durante horas en sus oficinas, «retorciendo la cola del cosmos», como diría más tarde el propio Murray. Pero se trataba de un matrimonio con incompatibilidad de caracteres: Gell-Mann era el epítome del científico culturalmente educado, juzgaba con severidad y dureza a los demás y sus ideas, y siempre estaba preocupado por la prioridad en un descubrimiento científico. Por el contrario, Feynman nunca se preocupó por quién se llevaba los laureles; solo le preocupaba si la propuesta era correcta o errónea.

¿IZQUIERDA O DERECHA?

Imaginemos que con nuestros gigantescos radiotelescopios contactamos con una civilización extraterrestre y que solo es posible hablar con ellos por radio. En estas condiciones, ¿cómo les diríamos a los alienígenas cuál es su derecha? No podemos decirles que tomen una brújula y miren al norte, porque lo que llamamos norte es producto de una decisión arbitraria. Si consultamos una brújula, debemos ser conscientes de que la parte pintada de rojo es la que apunta al norte; si no, podríamos escogerlo como quisiéramos.

Reflexionando un poco, podemos llegar a la conclusión de que, en estas condiciones, perseguimos una meta quimérica, pues las leyes de la física no distinguen entre izquierda y derecha. Dicho de otra forma, si nos enseñan una filmación de un choque entre coches o de una partida de billar seríamos incapaces de distinguir si nos están proyectando las imágenes directamente o, por el contrario, lo hacen después de reflejarlas en un espejo. Todo sucede exactamente igual. En física esta simetría especular recibe el nombre de conservación de la paridad.

No todos los objetos del universo son simétricos cuando los miramos en un espejo. Una esfera estática sí lo es, y se dice que posee paridad par. Si no lo fuera tendríamos un objeto de paridad impar. Ahora bien, esta simetría (geométrica) no se mantiene si ponemos a nuestra esfera en rotación sobre su eje, pues no es igual a su reflejo especular (véase la figura).



Una transformación de paridad convierte una esfera que rota en un sentido en otra que lo hace en el sentido contrario. Esto podemos comprobarlo haciendo girar una pelota delante de un espejo. Es más, la vieja cuestión de por qué un espejo cambia izquierda por derecha pero no arriba por abajo es porque tras él se oculta una transformación de paridad: invierte el eje perpendicular al espejo manteniendo los otros dos, situados en el plano del mismo. Esta situación es equivalente a la definición clásica de paridad, que se define como la simetría que surge al invertir todas las direcciones espaciales.

La ley de conservación de la paridad nos asegura que objetos con paridad impar no pueden convertirse espontáneamente en objetos pares. Esto es importante, pues si no se cumpliese podríamos usar este cambio espontáneo de paridad para definir una derecha e izquierda absolutas. En el caso de las partículas subatómicas, la teoría dice que si la paridad se conserva, una partícula par no puede desintegrarse dando una partícula par y otra impar, pero sí puede hacerlo en dos impares o dos pares.

Sin embargo, los físicos habían descubierto que los extraños kaones no obedecían esta regla. Se desintegraban en otras partículas más ligeras llamadas piones, pero a veces eran dos y otras veces tres. Una manera de explicar este comportamiento tan anómalo, explica Feynman, es que esa partícula:

> A veces se desintegraba en dos piones y otras en tres piones. Pero nadie lo iba a aceptar, porque hay una ley llamada la conservación de la paridad que se basa en la suposición de que todas las leyes de la física son simétricas a su imagen especular, y dice que una cosa que se convierte en dos piones no puede convertirse también en tres piones.

La única alternativa aceptable era que debían existir dos tipos de kaones, cada uno con su paridad definida. Y esto también era un problema porque estos dos kaones, que los físicos llamaron *tau* y *theta*, era totalmente idénticos —ambos eran bosones, tenían la misma masa y la misma vida media— y únicamente se distinguían en ese insignificante detalle.

SIMETRÍAS



Emmy Noether hacia 1910.

La física busca regularidades en el comportamiento del mundo, lo que en general se conoce como «leyes de la naturaleza», muchas de las cuales las podemos describir mediante fórmulas matemáticas. Uno de los patrones de búsqueda de las leyes naturales no es otro que el de simetría. Todos nos hemos enfrentado alguna vez a ella. Cuando hacemos girar un balón de fútbol sobre nuestro dedo, nuestra percepción del balón no cambia: es lo que se conoce como *simetría rotacional*; una serie alineada de coches del mismo tipo y del mismo color presenta *simetría traslacional*, pues es indistinguible de otra en la que el último coche hubiera sido colocado el primero; y nosotros mismos, salvo detalles muy particulares, somos indistinguibles de nuestra imagen reflejada en un espejo: es la *simetría especular* o *paridad*. Todos estos ejemplos nos permiten entender el significado de la palabra «simetría»: representa «algo» que se mantiene sin cambio después de una transformación. ¿Por qué son importantes en la física? Porque las leyes naturales representan simetrías presentes en el universo. La famosa ley de conservación de la energía no es otra cosa que una simetría: hay una cantidad, la energía, que se mantiene *invariante*.

El teorema de Noether

Quien nos guió por este camino fue una joven matemática alemana llamada Emmy Noether (1882-1935), cuando en 1918 demostró un teorema que hoy conocemos en su honor como el teorema de Noether. En la tranquilidad de su casa, pues entonces las mujeres no podían ser profesoras universitarias, encontró que para cada simetría que existe en la naturaleza debe existir también una cantidad que se mantiene constante en el tiempo. El teorema de Noether nos asegura que la conservación de la energía existe porque las leyes de la física no cambian con el tiempo: son las mismas hace cien años que ayer o que pasado mañana. Otra cantidad que se conserva es el momento lineal (el producto de la masa por la velocidad de una partícula), porque las leyes de la física presentan simetría traslacional: no importa que hagamos un experimento en San Francisco o en Madrid, siempre obtendremos los mismos resultados. El teorema de Noether también asegura que si no vemos ningún cambio en la naturaleza cuando cambiamos la derecha por la izquierda, existe una cantidad, la paridad, que se mantiene invariante.

EL ELECTRÓN ES ZURDO

Esta era la situación en la primavera de 1956, cuando Gell-Mann y Feynman empezaron a colaborar. Para entonces, Feynman era un científico famoso entre sus colegas: sus diagramas formaban parte de la vida cotidiana de los físicos y cuando pasaban por el Caltech se esforzaban en ir a saludarle. Todo el mundo quería hablar con él porque estaban deseosos de contarle sus problemas con la física y él les escuchaba: la misma característica que le hacía irresistible a las mujeres valía también para sus colegas.

Ese año ambos asistieron al encuentro más importante de la física de partículas, la Conferencia de Rochester, pues todavía se celebraba en esta ciudad al norte del Estado de Nueva York, desde la cual, y por casualidades de la vida, a mediados del siglo XIX se había diseminado al mundo el espiritismo moderno. El rompecabezas tau-theta flotaba en el ambiente. En la noche del viernes un joven llamado Martin Block le dijo a Feynman por qué la paridad tenía que conservarse en la interacción débil: a lo mejor ambos eran procesos de una misma partícula que violaba la conservación de la paridad. Feynman estuvo a punto de llamarle idiota por pensar semejante cosa, pero enseguida se dio cuenta de que no se le ocurría una respuesta adecuada.

Al día siguiente, cerca del final de la última sesión del sábado, Feynman se puso en pie y preguntó, acreditando la paternidad de la idea a Block, si la interacción débil podía violar la paridad. Las actas del congreso revelan que respondió un joven teórico llamado Chen Ning (Frank) Yang. Dijo que estaba investigando esa posibilidad, pero aún no había llegado a ninguna conclusión. Sin embargo, el propio Block recordaba que la respuesta de Yang fue otra: no tenía pruebas de que existiera tal violación. Tras la reunión, Feynman y Gell-Mann discutieron sobre este asunto y llegaron a la conclusión de que no había ninguna razón de peso para afirmar que la fuerza débil no violara la conservación de la paridad. Pero si era así, cualquier cosa podía suceder. Ya nada podía darse por seguro. De regreso a su universidad, Yang y su compañero Tsung Dao Lee revisaron todos los datos experimentales disponibles y no encontraron ninguno que pudiera dejar zan-

jado el dilema. Así que propusieron un experimento para dilucidar definitivamente si la fuerza débil no conservaba la paridad. En esencia, consistía en comprobar si en la desintegración β se producían más electrones hacia la izquierda que hacia la derecha. En junio de 1956 publicaron un artículo en el que plantearon dicha posibilidad. Realmente era una locura, pero consiguieron persuadir a una colega de la Universidad de Columbia, Chien-Shiung Wu, para convertir su especulación teórica en un experimento real. Fueron tan persuasivos que convencieron a Wu para que adelantara su regreso de unas vacaciones por Europa con su marido y así realizar el experimento. Wu encontró que al enfriar cobalto radiactivo y colocarlo dentro de un campo magnético, los electrones producto de la desintegración β salían preferentemente hacia la izquierda. Al poco de saberlo, el futuro premio Nobel de Física de 1988 y compañero de la Universidad de Columbia, Leon Lederman, decidió comprobar los resultados de Wu y reconfiguró sus instrumentos un viernes para hacer el experimento. El lunes obtuvo la confirmación: el electrón era zurdo.

«Para la existencia de la ciencia es necesario cabezas que no acepten que la naturaleza debe seguir ciertas condiciones preconcebidas.»

— RICHARD FEYNMAN. *EL CARÁCTER DE LA LEY FÍSICA* **(1965).**

El descubrimiento de la violación de la paridad causó tal conmoción entre la comunidad de físicos que, según se cuenta, Feynman se enteró de ello en la cola del supermercado y se puso a bailar. Al año siguiente, en 1957, Lee y Yang recibían el premio Nobel. Sorprendentemente, los miembros del comité Nobel dejaron fuera del premio a Wu.

UNA TEORÍA DÉBIL

En la Conferencia de Rochester de 1957, Lee explicó las implicaciones que se deducían de una observación muy sencilla: el neu-

trino era, inherentemente, zurdo. Todas las partículas conocidas podían presentar las dos direcciones de espín (si lo imaginamos como una rotación quiere decir que pueden girar tanto a favor de las agujas del reloj como en sentido antihorario) excepto el neutrino. Esto llamó la atención de Feynman. Recordó que la ecuación similar a la de Dirac que derivó de su formalismo de la integral de camino se podía aplicar perfectamente a las peculiaridades del neutrino. El único problema era que al hacerlo se obtenían resultados diferentes a los obtenidos experimentalmente. Y lo más raro de todo era que los datos experimentales eran inconsistentes con una única fuerza en juego. Si se escriben todas las formas de interaccionar que tienen los neutrones, protones, electrones y neutrinos, se obtenían cinco posibilidades («corrientes» es el término técnico) compatibles con la relatividad: escalar (S), vectorial (V), vectorial axial (A), pseudoescalar (P) y tensorial (T). Fermi pensaba que la desintegración β se podía explicar como una corriente vectorial (V), y así se creía hasta 1956, cuando se descubrió que la fuerza débil violaba la paridad. Esto cambiaba las cosas, pues entonces debían combinarse dos de esas cantidades, y los experimentos parecían indicar que debía ser S y T o V y T. Sin embargo, las ecuaciones de Feynman señalaban sin duda alguna a una combinación de V y A. Emocionado, tenía que contárselo al resto de sus colegas, pero no estaba previsto que él hablara. Así que usó todas sus dotes y encanto para persuadir a un colega de que le prestara cinco minutos de su propio tiempo de exposición para presentar sus ideas. Irónicamente, ese colega fue Kenneth Case, el mismo al que en las épocas heroicas de la QED Feynman demostró que su trabajo estaba equivocado. Expuso su sugerencia y al terminar la conferencia se marchó a pasar el verano a Brasil.

Feynman estaba obsesionado con encontrar una formulación universal para la última de las cuatro fuerzas de la naturaleza que quedaba por describir; creía que era su última oportunidad para enunciar una ley fundamental. Cuando regresó, Gell-Mann le contó que habían estado hablando con el físico de la Universidad de Rochester, Robert Marshak, y su colaborador, el joven hindú E.C.G. Sudarshan, sobre la posibilidad de que V-A fuera la única

posibilidad para la interacción débil. Tal charla fue el chupinazo de salida para Feynman; su idea era, al final de todo, correcta:

> Me levanté como una flecha de la silla y dije: «Entonces, ahora lo entiendo todo. Lo entiendo todo y mañana por la mañana os lo explico». Creyeron que estaba bromeando, pero no era así. Necesitaba liberarme de la tiranía de S y T porque tenía una teoría para V y A.

Feynman estaba convencido de que era la única persona en el mundo que entendía cómo la V-A producía una forma universal para la interacción débil. A una velocidad sorprendente se puso a escribir un artículo, su gran esperanza de proporcionar al mundo una nueva teoría de la naturaleza. Mientras, Gell-Mann, que se había enterado de que Feynman estaba escribiendo su propuesta y, a pesar de haber asegurado a Marshak que no lo iba a hacer, se dispuso a hacer lo propio con sus ideas sobre la V-A. De este modo, el director del departamento de física se encontró con que sus dos mentes más brillantes estaban escribiendo sendos artículos sobre el mismo tema. Era algo inaceptable y les pidió que formaran equipo y redactaran uno solo. Sorprendentemente, aceptaron.

El artículo resultante, en palabras del físico Lawrence Krauss, «fue un revoltijo de estilos, pero sin duda alguna una obra maestra». Poseía lo mejor de ambos: el formalismo de Feynman para los neutrinos y las reflexiones de Gell-Mann sobre simetrías y cantidades conservadas en las corrientes débiles. Mientras, el pobre Sudarshan tuvo que soportar charla tras charla cómo se atribuía la idea del V-A a estos dos físicos. Y a pesar de que los dos genios del Caltech reconocieron por activa y por pasiva tanto sus conversaciones con Marshak y Sudarshan como que ellos habían tenido inicialmente la idea, el único artículo que se citó año tras año como la referencia clásica sobre el tema fue el de Gell-Mann y Feynman.

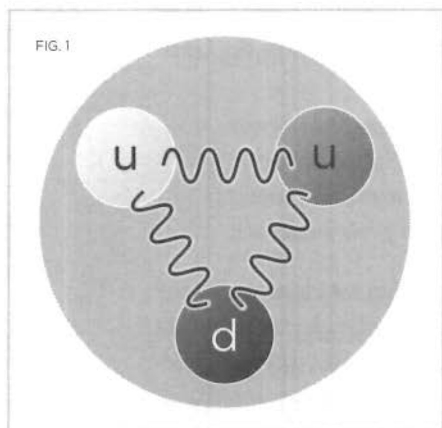
Sin embargo, no era una teoría completa. Tampoco significó el comienzo de una fructífera colaboración: había sido un matrimonio de conveniencia y tenía fecha de caducidad. Ambos recorrieron caminos paralelos y mientras Feynman se dedicó a otros menesteres fuera de la física de partículas, Gell-Mann se embarcaba en lo que iba a ser su gran contribución, merecedora del

premio Nobel. Feynman regresó a este campo tiempo más tarde para convencer a sus colegas de que la gran invención de Gell-Mann, los quarks, debía ser real.

AL INTERIOR DEL PROTÓN

Sucede con relativa frecuencia que las matemáticas vienen a sacar las castañas del fuego a los científicos. Durante el siglo XIX se había desarrollado toda una rama de la ciencia que clasificaba las simetrías organizándolas en grupos: es la llamada, a la sazón, *teoría de grupos*. En ella, un grupo de simetrías es el conjunto de todas las transformaciones de un cierto tipo que dejan algo invariante. Lo que en un principio era una teoría tremendamente abstracta y, por tanto, con ninguna utilidad práctica, se reveló a mediados del siglo XX como fundamental para entender la física de lo muy pequeño.

En 1962, Murray Gell-Mann anunció en la Organización Europea para la Investigación Nuclear de Ginebra (CERN) que el caos de partículas se podía organizar siguiendo unos criterios que bautizó como «el camino óctuple», en clara alusión a la filosofía budista. Su teoría —que también fue formulada independientemente por el israelí Yuval Ne'eman— predecía una nueva partícula, Ω^- (omega menos), que fue descubierta al año siguiente primero en Brookhaven y luego en el CERN. Gell-Mann, y al mismo tiempo Ne'eman, estaban estudiando la interacción fuerte, la fuerza que hace que protones y neutrones queden pegados en el interior del núcleo atómico. Ambos descubrieron en el cajón de sastre de las simetrías una que les venía muy bien para describirla: los grupos de Lie, llamados así en honor del matemático noruego Sophus Lie. En particular, uno con el esotérico nombre de SU(3), de donde se deducía la existencia de partículas más pequeñas a partir de las cuales se construían los protones y neutrones: Gell-Mann los llamó *quarks* (véase la figura 1). La idea proponía que las partículas pesadas, como los protones, los neutrones o los mesones, estaban construidas a partir de estas partículas más pequeñas que poseían, y esta era una de las sorpresas, cargas eléctricas fraccionarias,



La estructura interna del protón según el modelo de los quarks de Gell-Mann (u: *quark up*; d: *quark down*).

1/3 o 2/3 la del electrón (que en sí era fundamental y no estaba compuesto por nada más). La otra sorpresa es que el conjunto de todas las partículas pesadas podía explicarse con la existencia de tres familias que contenían dos quarks cada una: *up* (arriba) y *down* (abajo), *strange* (extraño) y *charm* (encanto), *top* (cima) y *bottom* (valle). Esta clasificación permitía, además, predecir la existencia de otras partículas, como la Ω^-, que aún no habían sido descubiertas, y de este modo poner a prueba la validez de esta hipótesis.

Ahora bien, Gell-Mann no estaba demasiado convencido, o no lo demostraba públicamente, de que su camino óctuple fuera algo más que un artificio matemático para clasificar las partículas: «Es divertido especular sobre la forma en que los quarks se comportarían si fueran partículas físicas con masa finita». Una de las principales objeciones era que jamás se habían encontrado partículas con carga menor que la del electrón. El debate estaba en el aire.

En 1968, Feynman volvió a la física de partículas. Los experimentos realizados en los aceleradores de colisiones de hadrones (un término que se utiliza para designar a todas las partículas compuestas por quarks) le llevó a formular una teoría en la que cada hadrón estaba compuesto por otras partículas más pequeñas que llamó «partones». Conscientemente, Feynman se había apartado del debate sobre si los quarks eran reales o un artificio matemático con la lapidaria frase de que su médico le había prohibido hablar de metafísica.

Ese año, en el acelerador lineal de Standford se lanzaron electrones muy energéticos contra protones. Se trataba de un experimento que recordaba al realizado por Rutherford en 1911 y que determinó la estructura del átomo. Al igual que entonces, los resultados de Standford eran consistentes con que el protón no era un objeto puntual, sino que tenía forma: había algo en su interior. Feynman visitó Stanford en agosto y en octubre y convenció a sus

HIGGS, EL PADRE DE TODA LA MATERIA


El físico británico Peter Higgs en 2009.

Uno de los grandes enigmas de la física de partículas es entender por qué las partículas subatómicas tienen las masas que tienen. En la década de 1960, el físico británico Peter Higgs (1929), entre otros, propuso una elegante solución al problema. Todo el universo está repleto por un campo que llena el espacio y cuando las partículas interaccionan con él, adquieren lo que parece ser su masa. Para entenderlo, los físicos suelen recurrir a la siguiente analogía. Imaginemos que estamos en una fiesta con los más famosos actores de Hollywood. De repente, entra una despampanante estrella del momento. Quienes están junto a la puerta se dan cuenta, empiezan a acercarse para entablar conversación con ella y se agrupan a su alrededor. A medida que se mueve por la sala, los asistentes más cercanos se ven atraídos por la actriz y se acercan, y cuando se aleja de ellos regresan a sus conversaciones iniciales. De este modo, la joven diva de Hollywood se mueve con más dificultad por la sala que si estuviera sola, y le cuesta más ponerse en movimiento una vez que se ha detenido para responder a las preguntas, pues todos intentan acaparar su atención. Este efecto de acúmulo de personas alrededor de la estrella de cine es el mecanismo de Higgs.

Un poco más allá

Es necesario notar que lo que acabamos de describir es, nada más y nada menos, la forma en que funciona lo que llamamos «masa». No solo es un concepto que sirve para medir el peso en una báscula, sino que es la manera que tenemos de determinar la resistencia de un cuerpo a cambiar su estado de movimiento, la inercia. Así sentimos ese campo de Higgs que llena el universo y afecta a todas las partículas: una que se mueva por él crea una pequeña distorsión —la gente que rodea a la diva en la fiesta— y eso le confiere la masa. Es la varita mágica del hada madrina de la física. Todo campo lleva asociada una partícula portadora que, en este caso, recibe el nombre de «bosón de Higgs». Desde el CERN de Ginebra hasta el Fermilab de Chicago, los físicos llevaban varias décadas intentando encontrarlo hasta que el 4 de julio de 2012, en una multitudinaria rueda de prensa, el CERN anunciaba que había encontrado una nueva partícula «consistente con el bosón de Higgs».

colegas de que su idea de los partones hacía muy fácil estudiar la estructura del protón. Como solía hacer, no les impuso demasiadas condiciones, salvo el que eran puntuales y que se movían libremente dentro del protón, probando de este modo que podía explicar maravillosamente bien los resultados del acelerador.

Realmente, los quarks de Gell-Mann y los partones de Feynman eran caminos que se dirigían al mismo destino, y estos constituyentes de la materia definían un nuevo campo cuántico que permitiría construir una teoría que diera cuenta de la interacción fuerte. Pero nadie los había visto, aunque sí se habían intuido en experimentos como el de Standford. Por este motivo, Feynman, en combinación con dos estudiantes, se embarcó en 1970 en la aventura de revisar el catálogo de partículas elementales para descubrir si el modelo de los quarks podría estar subyacente. Al final se convenció de ello; se convirtió, como el dijo, en «quarkeriano».

Mientras, Gell-Mann no perdía oportunidad de ironizar con los partones llamándolos *put-ons* (algo así como «tomadura de pelo»). Le repelía hasta el nombre, que Feynman había derivado de la palabra inglesa *part*, parte. Incluso si en algún seminario alguien mencionaba el modelo de partones de Feynman, él inmediatamente se levantaba y preguntaba qué era ese modelo. Gell-Mann sentía que su colega había simplificado en demasía su modelo de los quarks y no entendía por qué insistía en él cuando el suyo era, a todas luces, más completo y mejor. Lo que no veía es que Feynman había llegado a sus partones por un camino diferente al suyo: mientras que Gell-Mann sacó sus quarks de la chistera matemática de las simetrías y su concepción teórica del mundo, Feynman había hecho lo propio buscando lo que siempre había hecho cada vez que formulaba una teoría: ver si la posible estructura interna de los hadrones tenía alguna consecuencia observable.

El espaldarazo al modelo de los quarks llegó en 1974. El lunes 11 de noviembre de ese año, un emocionado Richard Feynman hablaba con su colega Harald Fritzsch en los pasillos del departamento de Física Teórica del Instituto Tecnológico de California. En el acelerador lineal de Stanford, el SLAC, ochocientos kilómetros al norte, se acababa de descubrir una partícula que parecía poseer uno de los quarks de Gell-Mann: el encanto.

CAPÍTULO 6

Nanotecnología y ciencia pública

Feynman no solo fue un brillante físico teórico, sino también un visionario. Fue él quien puso las bases de lo que es la nanotecnología e impulsó a los investigadores a ir tras ella. Se convirtió en una estrella científica mediática gracias a su participación en la comisión que investigó el desastre del transbordador Challenger, dos años antes de su muerte.

En 1958, Feynman había acudido a Ginebra para asistir a un congreso sobre la interacción débil y, además, citarse con la mujer de un colega del Caltech con la que estaba teniendo una aventura que había comenzado antes del abrupto final con el que terminó otra con una mujer casada. De hecho, acababa de recibir una carta de esta última diciendo que su *affaire* había terminado y que debía enviarle quinientos dólares. Al parecer, se había puesto en contacto con antiguos ligues suyos —mencionaba varios nombres— y le dijo que uno de ellos le había mandado una nota anónima:

> El Sucio Dick, el asqueroso y gilipollas Feynman está saliendo contigo. Nunca se casará contigo. Dile que te ha dejado preñada. Le sacarás de 300 a 500 dólares.

Y terminaba recordándole que ella tenía en su poder la medalla Einstein.

En Ginebra, su ligue le dio plantón, pues ella prefería verlo en Inglaterra (no sabemos si al final se vieron). Así que Feynman se quedó sin compañía femenina en la capital Suiza. Un día, paseando por una de las playas del lago Lemán se puso a hablar con una joven británica de veinticuatro años, Gweneth Howarth, hija de un joyero de una ciudad llamada Rippoden. Estaba viajando alrededor del mundo porque se había cansado de su aburrida vida de biblio-

tecaria a tres libras la semana en un lugar solitario del condado de Yorkshire. Para pagarse los gastos, trabajaba como *au pair* en la ciudad donde llegaba. En ese momento tenía dos hombres en su lista de novios: un corredor semiprofesional de la milla que vivía en Zúrich y un óptico de Sarrebruck, en la frontera de Alemania con Francia. Feynman la invitó esa noche a ir a un *night club*. Algo debió de ver en ella porque le pidió que se convirtiera en su asistenta del hogar en California. Gweneth le dijo que se lo pensaría.

Terminado el congreso Feynman regresó a Estados Unidos y ella siguió con su viaje: no tenía muy claro si acudir a Pasadena. Mientras, Feynman hizo sus deberes para que Gweneth pudiera entrar en el país. Un amigo le dijo que no era muy apropiado que fuera él quien la avalara, un hombre de cuarenta años que invita a una mujer de veinticuatro a vivir en su casa. Así que fue un colega, Matthew Sands, quien se ocupó de la burocracia en su nombre. Mientras, la extorsionadora le volvió a escribir diciéndole que se lo había contado todo a su marido. Se sentía utilizada y le pedía más dinero: «Serás muy listo en tu trabajo pero en las relaciones personales eres un idiota». También le aseguraba que su medalla Einstein estaba «a salvo», al igual que la copia del Rubaiyat del poeta iraní Omar Jayyam con dibujos cuidadosamente coloreados por Arline.

Feynman le escribió rogándole que volvieran a verse y diciéndole que, a pesar de todo, quería casarse con ella. Esto despertó en ella los buenos recuerdos que guardaba de sus encuentros con él, como la acampada bajo las estrellas en el parque nacional Joshua Tree. Pero tales imágenes no compensaron su ira y lo rechazó.

Al poco, Feynman recibió una carta formal del marido en la que le pedía una compensación: «Se ha aprovechado de su posición y salario para seducir a una joven impresionable y alejarla de su marido... Hicieron planes clandestinos de vacaciones... Pienso que debe pagar por satisfacer su placer egoísta». Al final le pedía un total de 1250 dólares, que Feynman rehusó pagar. Intentó aplacar al soliviantado esposo. «Perdónela y hágala feliz», le escribió. Él le amenazó con un pleito, pero el abogado de Feynman le dijo que se olvidara, que tal denuncia nunca llegaría a los tribunales. Las últimas palabras fueron de la amante despechada:

Espero que seas feliz con tu criada. Ahora siempre te podrás acostar con ella... Pero lo que no puedo entender es por qué le tienes tanto miedo al matrimonio.

Al final, le devolvió la medalla y el libro.

Gweneth llegó a Pasadena en el verano de 1959. Allí encontró un hombre con cinco pares iguales de zapatos, una serie de trajes azules de costura francesa y camisas blancas que siempre vestía abiertas al cuello. No tenía ni radio ni televisión. Al principio, Feynman ocultaba la presencia de la joven británica en su casa a todo el mundo salvo a un reducido grupo de amigos. Poco a poco fueron apareciendo en público juntos, aunque llegaban y salían de las fiestas y reuniones separados. En menos de un año, Feynman se dio cuenta de que la amaba y quería casarse con ella. Marcó un día en el calendario para decírselo y a medida que se aproximaba la fecha estaba cada vez más nervioso. La víspera mantuvo a Gweneth despierta hasta la medianoche, y entonces se lo pidió. Se casaron el 24 de septiembre de 1960 en el hotel Huntingdon de Pasadena. A los dos años tuvieron su primer hijo, Carl, y poco después adoptaron una niña, Michelle. El balarrasa se había convertido en un hombre de familia.

UN MAESTRO DE MAESTROS

En 1961, Feynman destinó toda su energía creativa a algo muy diferente a la investigación. Robert Bacher, el director de departamento que había forzado a que colaborara con Gell-Mann en el tema de la fuerza débil, decidió dar un vuelco a las aburridas clases de física general con las que desanimaban a los alumnos y los alejaban de los emocionantes descubrimientos de la física más reciente. Sands sugirió que el mejor para hacerlo era, sin duda alguna, Feynman. Así que entre 1961 y 1963 Richard Feynman impartió dos cursos de física elemental para los estudiantes de los primeros años del Caltech. Sabiendo que era un hecho histórico, decidieron grabar en vídeo las clases y tomar fotografías de todo lo que escribiera en la pizarra.

Las clases se convirtieron en todo un evento. De hecho, quienes acabaron por asistir a ellas fueron profesores y graduados en busca de una nueva y refrescante manera de enfocar la física «de toda la vida» a partir de primeros principios, la manera característica de trabajar de Feynman. Vistas en perspectiva, aquellas clases realmente no estaban destinadas a estudiantes de los primeros cursos, sino a quienes ya poseían un conocimiento previo. Según escribió en el prólogo uno de los que recogieron y editaron estas lecciones en forma de libro, Matthew Sands, «este fue el regalo de quien fuera un extraordinario maestro de maestros».

FÍSICA X

Durante más de dos décadas Feynman impartió una misteriosa clase para estudiantes de primer curso del Caltech, aunque también acudían doctorandos y profesores, que recibía el nombre de «Física X». Muchos físicos que asistieron a ella la recuerdan como la experiencia intelectual más intensa de su formación. No se recibía ningún crédito por asistir y no había que apuntarse en ningún lado; bastaba con acercarse a una pequeña aula en el sótano de la facultad un viernes a las cinco de la tarde. Algunos pensaban que era porque Feynman solo quería ver allí a estudiantes a los que realmente les interesaba estudiar física. «Lo más fascinante de esa clase es que no tenía temario», recuerda Marc Turner, un físico que pasó gran parte de la década de 1980 yendo y viniendo del Caltech. Simplemente aparecía por clase, cogía una tiza y decía: «¿Hay alguna pregunta?». Cualquier cuestión era válida, y se podía discutir desde los aspectos más abstrusos de la mecánica cuántica hasta la física de la flauta. De acuerdo con otro asistente, David Adler, que acudió a esas clases en 1979, «era la oportunidad de un primerizo en el Caltech de hacer preguntas a Feynman o, más a menudo a medida que el año avanzaba, de escuchar sus historias». Como aquella según la cual Feynman, cuando trabajaba en el Proyecto Manhattan, abrió una noche la caja fuerte de Los Álamos para demostrar que la seguridad no era tan buena como para proteger su trabajo. En cierta ocasión, alguien preguntó a Feynman cómo era posible que se acordase de todas las ecuaciones, pues jamás llevaba una nota. Y él, sonriendo, respondía que no se las sabía de memoria; le bastaba aprenderse los primeros principios a partir de los cuales deducía las que necesitaba. Esta era la forma de trabajar de Feynman: a partir de primeros principios.

Feynman era un profesor atípico. Cada día llegaba antes que los alumnos, a los que recibía con una sonrisa en los labios y dispuesto a regalarles una forma absolutamente diferente de enfocar la física, desde la mecánica clásica a la cuántica pasando por el electromagnetismo, la termodinámica, la mecánica de fluidos... Sus clases eran siempre un espectáculo, una «guía para perplejos», como le gustaba llamarlas, y quería que la falta de conocimiento de sus alumnos no fuera una lacra para entenderlas.

Sus clases nunca terminaban con un «continuaremos esto mañana». Como si de una obra teatral se tratara, tenían una introducción, un nudo y un desenlace. Sin embargo, era demasiado para los estudiantes recién llegados del instituto. Poco a poco iban desertando y en su lugar el aula se iba llenando de profesores y estudiantes graduados que esperaban que les contara la física de un modo más refrescante e intelectualmente estimulante. Sus clases fueron recogidas y transcritas, convirtiéndose en tres volúmenes, los libros rojos. Al contrario de lo que sucede con los libros de texto, las *The Feynman Lectures of Physics* aún se siguen reeditando y la inmensa mayoría de los estudiantes de física las compra y empieza a leerlas: son parte del ritual que debe seguir quien aspira a ser físico.

EL NOBEL

A las nueve de la mañana del 21 de octubre de 1965 un telefax de la Western Union lanzaba a Feynman, junto con Schwinger y Tomonaga, al olimpo de la ciencia: habían sido galardonados con el premio Nobel de Física por su «trabajo fundamental en electrodinámica cuántica que tuvo profundas consecuencias para la física de las partículas elementales». Como suele suceder con todos los galardonados, debían estar dispuestos a aceptar que su vida iba a cambiar de manera radical. A Feynman, que odiaba toda pompa, pensar eso no le sentaba nada bien. De hecho, pensaba que el Comité Nobel primero debía informar en privado a los futuros ganadores por si alguno prefería rechazarlo en silencio, sin montar ningún tipo de alboroto. Y, según decía,

no era el único en pensar así: su ídolo Paul Dirac pensaba de la misma forma.

El Nobel no cambió su personalidad ni un ápice: continuó interesado en cualquier aspecto de la física, siguió haciendo sus cuentas en el bar de *striptease* Gianonni's de Pasadena, al que iba cuatro o cinco veces a la semana y donde tenía una mesa reservada, según contó Frankie Evans, camarera de ese club en 1969 y que fue su «bloqueadora de estudiantes» del Caltech mientras estaba allí. Su rechazo a cualquier tipo de honor o cargo de importancia era tal que apostó diez dólares con Victor Weiskopf, entonces director del CERN, que en los diez años siguientes no ocuparía ningún puesto de responsabilidad en ninguna institución, un camino habitual entre los científicos de prestigio. No hace falta decir que Feynman ganó la apuesta.

«Feynman hizo los grandes descubrimientos, y yo fui solo su publicista. Me recompensaron bien por mi trabajo: conseguí un maravilloso trabajo de por vida en el Instituto [de Estudios Avanzados de Princeton]. No tengo de qué quejarme.»

— Palabras de Freeman Dyson al saber que no había sido escogido para el premio Nobel de 1965.

El premio Nobel a los creadores de la QED no estuvo exento de cierta polémica. Debido a la arbitrariedad del testamento de Alfred Nobel, únicamente puede darse a un máximo de tres personas, lo que dejó a Freeman Dyson fuera. Para algunos fue algo totalmente injusto porque los primeros artículos publicados que llamaron la atención sobre el formalismo de Feynman, quien demostró que sus tres colegas estaban describiendo esencialmente lo mismo, el que se convirtió en el abanderado y consiguió que el mundo entendiera la QED fue Dyson. Sin embargo, si el inglés sintió algún tipo de irritación por ser apartado de la gloria que llegaba de Suecia, nunca lo dijo. Lo cierto es que una de las razones por las que algunos intuyen que Dyson quedase fuera del Nobel es porque su contribución fue esencialmente matemática, y los del Comité Nobel aborrecen las matemáticas.

Curiosamente, en la década de 1950 Feynman había sido elegido miembro de la prestigiosa Academia Nacional de Ciencias (NAS), donde se ingresa por elección interna y cuya pertenencia se considera uno de los máximos honores que puede recibir un científico norteamericano. Cuando recibió el Nobel, Feynman llevaba cinco años intentando darse de baja de la NAS porque veía que su principal propósito era determinar quién era digno de entrar y quién no. «Encuentro psicológicamente muy desagradable juzgar los "méritos" de los demás.» Insistió en ello y dejó de mencionar su pertenencia a la NAS entre sus distinciones, pero la ansiada baja no llegaba: aún tendría que esperar otros cinco años hasta conseguir que estuviera oficialmente fuera de la Academia. Tampoco aceptó los títulos honorarios —como los doctorados *honoris causa*— que le ofrecieron las universidades de Chicago y de Columbia y rechazó centenares de otras propuestas con una sequedad que sorprendió incluso a su secretaria, Helen Tuck, que le protegía de las visitas cuando él estaba en el despacho. Para Feynman era agotador que darse de baja de una simple suscripción le obligara a mantener todo un intercambio epistolar. Cuando quiso cancelar la que tenía con la revista *Physics Today* tuvo que enfrentarse a una larga carta del director en la que le pedía que explicase un poco más sus motivos. Esto es lo que contestó Feynman:

> Estimado señor:
> No soy «físicos», solo soy yo. No leo su revista, luego no sé qué es lo que contiene. Quizá sea buena, no lo sé. Solo deje de enviármela. Por favor, elimine mi nombre de su lista de envíos. No tengo nada que decir de lo que otros físicos necesitan o no necesitan, quieren o no quieren... No es mi intención hacerles dudar de su revista, ni sugiero que dejen de publicarla, solo pido que dejen de enviármela. ¿Puede hacerlo por favor?

Su aislamiento de la política académica era casi absoluto. En raras ocasiones participó en las decisiones del departamento en la contratación de profesores, política de becas... Muchos de sus colegas lo veían como un comportamiento egoísta. Él decía que era «activamente irresponsable».

UNA PREDICCIÓN ACERTADA

En diciembre de 1959, Feynman dio una conferencia en el encuentro anual de la American Physical Society, que ese año se celebraba en el Caltech. Como siempre, Feynman sorprendió a propios y extraños con un análisis de todo un mundo de nuevas posibilidades que nada tenía que ver con la física de partículas. Comenzó así:

> Me gustaría describir un campo en el que hasta el momento se ha hecho muy poco pero en el que, en principio, se pueden conseguir una gran cantidad de cosas. Y lo más importante es que podría tener un gran número de aplicaciones técnicas. De lo que quiero hablar es del problema de manipular y controlar objetos a muy pequeña escala.

La conferencia, titulada «There is Plenty Room at the Bottom» («Hay mucho sitio al fondo»), está considerada como el pistoletazo de salida para toda una serie de campos de la ciencia y la técnica que hoy se conocen bajo el nombre global de nanotecnología.

El punto central de Feynman era que los expertos eran demasiado apocados cuando pensaban en la miniaturización, que había todo un universo accesible en el espacio comprendido entre las máquinas convencionales y los átomos. Si explotáramos ese espacio, imaginaba, no solo cambiaríamos la tecnología, sino que también se abriría todo un nuevo campo a la investigación científica: «En el año 2000, cuando se mire hacia atrás, todos se preguntarán por qué hasta 1960 nadie empezó a moverse seriamente en esa dirección».

Feynman reflexionaba a lo grande, como hicieran los tres popes de la ciencia ficción de entonces: Arthur C. Clarke, Isaac Asimov y Robert A. Heinlein. No entendía cómo era posible que la gente quedara impresionada porque una máquina pudiera escribir el padre nuestro en la cabeza de un alfiler; eso no era nada. Él veía que se podía escribir toda la *Encyclopaedia Britannica* en la cabeza de un alfiler. E incluso eso no era nada. ¿Por qué no escribir toda la información contenida en todos los libros del mundo? En una curiosa estimación, Feynman supuso que eso correspondía a 10^{15} bits de información (lo que, según Feynman, serían veinticuatro millones de volúmenes) y que fácilmente cada bit podía codi-

ficarse usando un cubo de cinco átomos de arista, o poco más de cien átomos en total. Así se tendría toda la información almacenada por la humanidad en la cabeza de un alfiler.

Feynman apostaba por explorar todo ese mundo de posibilidades que encierra la materia a escala atómica, y no habría investigación más apasionante que la ingeniería dedicada a diseñar máquinas cuánticas. No hay nada en las leyes de la física, decía, que impida «manipular las cosas átomo a átomo». En sus propias palabras:

> No me asusta considerar la pregunta final de si en el futuro podremos colocar los átomos como queramos: ¡los verdaderos átomos, aquellos que están al fondo! Y ¿cuáles serían las propiedades de los materiales si pudiéramos verdaderamente colocarlos como quisiéramos? No puedo saber exactamente qué pasaría, pero no tengo la menor duda

EL ORDENADOR DEL FUTURO

El futuro de la computación pasa por la construcción de un ordenador cuántico, del cual algunas de las ideas desarrolladas en torno a su diseño y funcionamiento ya encuentran aplicaciones prácticas en el presente. La transmisión de información mediante canales cuánticos ha permitido establecer un sistema de comunicación totalmente seguro. Entre 1982 y 1984, Charles Bennett y Gilles Brassard diseñaron el primer sistema de encriptación cuántica del mundo, el BB84, hoy ya superado. Aquí, las reglas cuánticas garantizan la seguridad en la comunicación hasta tal punto que una interceptación por parte de un agente extraño al sistema no solo es detectado por los comunicantes, sino que el «espía» no puede descifrar el mensaje. En la práctica, ya se ha conseguido transmitir información por un canal cuántico a través de una fibra óptica hasta una distancia de algunas decenas de kilómetros. Actualmente se está intentando hacerlo a distancias mayores, incluso desde un laboratorio terrestre hasta un avión. El campo parece progresar a gran velocidad: en los últimos años diversos grupos han sido capaces de construir procesadores y chips basados en computación y óptica cuánticas, se han conseguido mantener enlazados diez mil millones de átomos necesarios para poder hacer la computación y ha visto la luz un circuito integrado superconductor. En abril de 2012 se construyó el primer ordenador cuántico básico, de solo dos qubits o bits cuánticos.

de que si controlásemos la colocación de objetos a una pequeña escala tendríamos acceso a un amplio rango de nuevas propiedades con las que podríamos hacer una gran cantidad de cosas.

Una de esas cosas es aprovechar las reglas que rigen en el mundo cuántico para propiciar un cambio radical en los fundamentos de los ordenadores: son las máquinas cuánticas de Feynman. La computación cuántica está de moda, y cada vez esta utopía parece estar algo más cercana. El propio Feynman, en 1981, organizó en el Caltech un curso sobre la teoría del cálculo y el futuro de la computación y a consecuencia de ello publicó varios artículos sobre los ordenadores cuánticos. Este es el reto para los próximos años y la búsqueda merece la pena. Por hacernos una idea: factorizar números muy grandes —la base en la que están encriptadas nuestras tarjetas de crédito— puede llevar a un ordenador convencional varios millones de años hacerlo; un ordenador cuántico lo haría en una fracción de segundo.

Feynman no se detuvo aquí. También intuyó que esta manipulación traería todo un nuevo campo de posibilidades a la biología. Y lo hizo cuando tan solo tres años antes se había desentrañado la estructura de la molécula de ADN:

> En principio, es posible que un físico sintetice cualquier molécula que un químico le dibuje. Se le dan las órdenes y el físico sintetiza la molécula. Pero ¿cómo? Colocando los átomos allí donde el químico le ha indicado previamente. Y así creamos la sustancia.

Aquí Feynman se quedó corto. Desde el último cuarto del siglo XX toda una nueva rama de la ciencia se ha desarrollado a la sombra de esta idea: es la prometedora biología sintética. El término fue acuñado en 1974 por el genetista polaco Waclaw Szybalski cuando escribió: «Hasta ahora hemos estado trabajando en la fase descriptiva de la biología molecular... Pero el verdadero reto comenzará cuando entremos en la fase de la biología sintética. Entonces desarrollaremos nuevos elementos de control y los añadiremos a genomas existentes o construiremos otros totalmente nuevos». Esta combinación de bioquímica con genética

plantea dos preguntas que estamos muy cerca de poder contestar: ¿Cuántos son los genes mínimos necesarios para que exista vida? ¿Es posible construir un ser vivo *ex novo*?

¿QUÉ ES LA CIENCIA?

Una de las muchas citas apócrifas que se atribuyen a Feynman dice: «La excepción confirma que la regla es mentira. Este es el principio de la ciencia: si hay una excepción a cualquier regla y se puede probar por la observación, esa regla es falsa». Feynman era un enamorado de la ciencia y le preocupaba sobremanera la forma de enseñarla. Cuando le llamaron para evaluar los libros de texto que se utilizaban en las escuelas de Estados Unidos, el enfado de Feynman fue clamoroso:

> Todo estaba escrito por gente que no tenía ni idea de lo que estaba diciendo... ¿Cómo vamos a enseñar bien si usamos libros escritos por gente que no entiende del todo de qué está hablando?

En el decimoquinto encuentro anual de la Asociación Nacional de Profesores de Ciencias celebrado en 1966, Feynman dio una célebre conferencia sobre lo que él entendía que era la ciencia. En ella dejó traslucir, además de su estilo teatral característico, el poco aprecio que tenía por la filosofía. Como solía decir, «los filósofos están siempre haciendo comentarios estúpidos». En este caso, contrapuso las opiniones de William Harvey, el médico que describió en detalle el sistema circulatorio —un hombre gracioso, colérico y extremadamente meticuloso—, con las de Francis Bacon, lord canciller, padre del empirismo y figura clave en el desarrollo del método científico:

> Uno de los grandes científicos experimentales de su tiempo, que realmente estaba haciendo algo, William Harvey, dijo que lo que Bacon decía sobre lo que era la ciencia, era la ciencia que un lord canciller haría. Bacon habla de hacer observaciones, pero omite el factor

esencial que es el juicio sobre qué observar y a qué prestar atención. Y eso es la ciencia, no lo que los filósofos han dicho que es.

El tipo de conocimiento científico por el que abogaba Feynman era el pragmático, no el descriptivo. Su autobiografía comienza contando su pasión de niñez por la experimentación en su laboratorio, un viejo cajón de embalaje de madera al que le puso unos estantes, y su capacidad para arreglar radios descompuestas. Ya de adulto, sus contribuciones a la física demuestran que no abandonó esta forma de entender la ciencia en toda su vida. Su trabajo no fue conocimiento por conocimiento, ni siquiera conocimiento de algo. Es, como dice el escritor James Gleick, conocimiento de cómo hacerlo: «cómo calcular la emisión de luz de un átomo excitado, cómo juzgar los datos experimentales, cómo hacer predicciones, cómo diseñar nuevas herramientas para las nuevas partículas elementales que empezaban a proliferar en la física».

Sin embargo, no se debe olvidar un aspecto fundamental que ya señaló Feynman: «Es necesario recordar el valor de la ciencia a los chicos, y a todo el mundo, no solo porque les hará ser mejores ciudadanos o más capaces de controlar la naturaleza». ¿Cuál es ese valor? En palabras del propio Feynman:

> La visión del mundo que nos da la ciencia tiene su valor. Hay belleza en las maravillas del mundo que descubrimos como resultado de esas nuevas experiencias [...] El mundo parece diferente tras aprender ciencia. Por ejemplo, los árboles están hechos ante todo de aire. Cuando se queman, vuelven al aire y en el calor generado se libera el calor del sol que fue fijado para convertir el aire en un árbol, y en las cenizas está el pequeño remanente de la parte que no viene del aire sino de la tierra. Estas son cosas bonitas, y la ciencia está maravillosamente repleta de ellas. Son inspiradoras y las podemos usar para estimular a otros.

Quien bebe por primera vez de los posos de la racionalidad no dejará de hacerlo jamás. «Las ciencias —decía Aristóteles— tienen las raíces amargas, pero muy dulces frutos.» Para hacerlo, no

es necesario ser inteligente; simplemente debemos utilizar las «pequeñas células grises» del ficticio detective belga Hercule Poirot, y Richard P. Feynman las usó de la manera más creativa posible.

ADIÓS, DICK

Feynman dedicó los últimos diez años de su vida a estudiar las costumbres de las tribus nómadas asiáticas de Tuva, una pequeña república autónoma de la antigua URSS en la frontera con Mongolia. También participó en la investigación que desveló lo sucedido en el desastre del transbordador espacial Challenger en 1986 y que le dio una tremenda popularidad. De hecho, fue él quien hizo pú-

UN CONCEPTO ERRÓNEO DE LA CIENCIA

En nuestra sociedad existe una percepción errónea de lo que es la ciencia. Para la mayoría no es más que una caja negra a la cual volverse para pedir soluciones ante problemas tecnológicos o médicos; en ningún momento se concede que la ciencia es, ante todo, una forma de pensamiento, cuando menos de conocimiento. Esta es una idea que, quizá por culpa de la tecnificación, hemos perdido. Por eso en muchas ocasiones podemos escuchar a alguien diciendo: «La ciencia no lo puede explicar todo». Feynman ya nos previno: cuando alguien dice «la ciencia nos enseña tal y tal cosa», está usando esa palabra incorrectamente. La ciencia no enseña nada; la experiencia, sí. Si te dicen que «la ciencia ha mostrado esto y aquello», podrías preguntar: «¿Cómo lo ha hecho? ¿Cómo lo encontraron los científicos? ¿Cómo? ¿Qué? ¿Dónde?». La ciencia es un proceso de retroalimentación: aprende de sus propios errores. Ahora bien, sufre de una fama extraña en nuestra sociedad. Se le reclama que dé la información exacta y oportuna de aquello que se le pregunta; se le pide la verdad. Pero en ningún lugar encontraremos más «podrías» y «quizá», más condicionales que en una revista científica. «Lo que llamamos hoy conocimiento científico —decía Feynman— es un corpus de enunciados con grados de certeza variables. Algunos de ellos son muy seguros; otros son casi seguros; pero ninguno es absolutamente cierto. Los científicos están acostumbrados a esto. Sabemos que es compatible ser capaces de vivir y no saber.»

blico lo que había sucedido y cómo los funcionarios de la NASA habían desoído las recomendaciones de los expertos: mientras ellos decían que las posibilidades de que una catástrofe pudiera ocurrir durante un vuelo eran de solo 1 entre 100 000, los ingenieros la calculaban en 1 entre 200. Feynman coincidía con ellos.

«El reloj de la nave espacial que circula a la velocidad de la luz irá más despacio, pero también el cerebro del que lo lleva.»

— Richard Feynman. *El carácter de la ley física* (1965).

El informe final de la comisión que revelaba el error tuvo que incluir uno personal del propio Feynman, porque si no, aseguró a su presidente, no lo iba a firmar. Feynman estaba indignado: la terrible desgracia, ocasionada por el mal sellado de la junta trasera del cohete impulsor derecho, fue culpa exclusiva de los directivos de la NASA. La causa inmediata estuvo en que las arandelas de caucho se habían endurecido por el frío extremo de la noche previa al lanzamiento y perdieron toda flexibilidad. Al endurecerse, el sellado no se realizó y la llama entró por la brecha. Los ingenieros habían estado alertando a sus superiores durante dos años sobre la poca fiabilidad del sellado de los impulsores y la noche anterior habían advertido de lo peligroso que podía ser el lanzamiento. Pero los responsables políticos de la NASA decidieron enviar el Challenger a su destrucción por cuestión de imagen, desoyendo todas las advertencias técnicas. Por eso Feynman terminó de esta forma su demoledor informe:

> Para que una tecnología tenga éxito es preciso que la realidad tenga precedencia sobre las relaciones públicas, pues a la naturaleza no se la puede engañar.

Tras una ceremonia oficial en la Casa Blanca, Feynman regresó a casa, como bien sabía, a morir.

En la primavera de 1984 empezó a darse cuenta de que algo no iba bien: se vestía con chaqueta y corbata para ir a dormir, dedicaba todos los días casi 45 minutos en localizar su coche aparcado

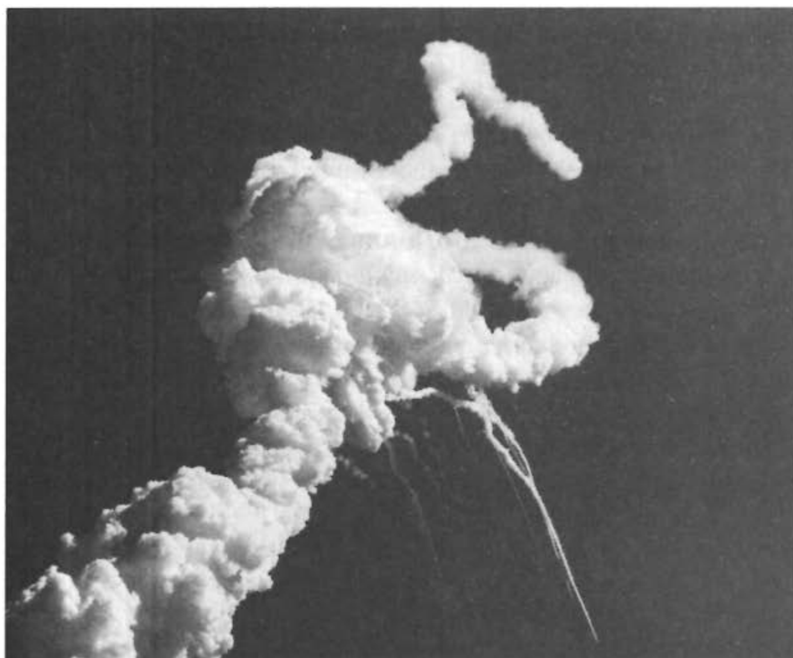


FOTO SUPERIOR:
Imagen de la explosión del transbordador espacial Challenger, el 28 de enero de 1986.



FOTO INFERIOR:
Una de las últimas apariciones en público de Richard Feynman (segunda fila, primero por la derecha) fue en febrero de 1986, cuando integró la Comisión Presidencial que investigó el accidente fatal del Challenger.

enfrente de su casa... Al final, tras dar una clase, se descubrió a sí mismo hablando de forma ininteligible. Un escáner cerebral encontró que un derrame estaba ejerciendo una presión sobre el tejido cerebral y fue operado de urgencia. Años más tarde se le descubrió un cáncer abdominal que se le reprodujo en octubre de 1987 y los médicos decidieron realizar un último intento para eliminarlo. Agotado y sin apetito, los médicos de la unidad de cuidados intensivos le descubrieron una úlcera duodenal y que el único riñón que aún funcionaba empezaba a fallar. La diálisis no servía de mucho y Feynman se negó a pasar más veces por la máquina para que le prolongara la vida solo unas cuantas semanas. Entonces, le dijo a su hija Michelle, «voy a morir», en un tono que ella recordaría como «lo he decidido». La administración de morfina y oxígeno fue su única concesión a la medicina paliativa. Los médicos le comunicaron que le quedaban cinco días. Poco a poco iba perdiendo la consciencia. Hablar se convertía en un esfuerzo sobrehumano. Al final le dijo a Gweneth su última frase, que seguramente tenía preparada: «Odiaría morir dos veces. Es tan aburrido». Poco antes de la medianoche del 15 de febrero de 1988, Richard Phillips Feynman dejaba este mundo. Tenía sesenta y nueve años.

Enfrentados a la muerte, los seres humanos no buscamos las respuestas correctas, sino aquellas que nos reconfortan. Necesitamos certezas para vivir; certezas, reales o ilusorias, que apaguen la angustia de la muerte. Feynman no pensaba de esa forma:

> Puedo vivir con la duda y la incertidumbre y sin saber. Creo que es mucho más interesante vivir sin saber que tener una respuesta que pueda ser errónea. Tengo respuestas aproximadas y creencias con diferente grado de certeza sobre diferentes cosas, pero no estoy absolutamente seguro de nada... No siento miedo de no saber cosas, de estar perdido en un universo misterioso sin propósito alguno, que es, hasta donde yo sé, como es en realidad. No me asusta.

Así era Feynman.

Al día siguiente de su muerte, dos estudiantes subieron al tejado de la Biblioteca Millikan del Caltech y colgaron una pancarta: «Te queremos Dick».

Lecturas recomendadas

FEYNMAN, R.P., *¡Ojalá lo supiera! Las cartas de Richard Feynman*, Barcelona, Crítica, 2006.

—: *¿Está usted de broma, Sr. Feynman?*, Madrid, Alianza, 1987.

—: *¿Qué te importa lo que piensen los demás?*, Madrid, Alianza, 1988.

—: *Electrodinámica cuántica*, Madrid, Alianza, 1988.

FRITZSCH, H., *Los quarks, la materia prima de nuestro universo*, Madrid, Alianza, 1984.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

GREENE, B., *El universo elegante*, Barcelona, Crítica, 2003.

GRIBBIN, J., *En busca de SUSY*, Barcelona, Crítica, 2000.

—: *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

—: *En busca del gato de Schrödinger*, Salvat Editores, 1994.

HOOF'T, G., *Partículas elementales*, Barcelona, Drakontos, 2008.

KRAGH, H., *Generaciones cuánticas: una historia de la física en el siglo XX*, Madrid, Akal, 2007.

NAVARRO FAUS, J., *Los caminos cuánticos. Feynman*, Madrid, Nivola, 2007.

ROSENBLUM, B. ET KUTTNER F., *El enigma cuántico*, Barcelona, Tusquets, 2012.

TERESI D. ET LEDERMAN L., *La partícula divina*, Barcelona, Drakontos, 2007.

TREFIL, J.S., *De los átomos a los quarks*, Barcelona, Salvat, 1985.

YNDURAIN, F.J., *Electrones, neutrinos y quarks*, Barcelona, Crítica, 2001.

Índice